

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Vjekoslav Sraga**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Student:

Vjekoslav Sraga

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću, dipl. ing. stroj. i članovima Katedre za motore i vozila na pruženoj pomoći, savjetima, strpljenju i utrošenom vremenu tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Aniti Domitrović i Davidu Gerhardingeru, mag. ing. aeroing. na pruženim informacijama o dnevniku letenja HZNS-a te gosp. Theu Rindlisbacheru na pruženim informacijama o emisijskim faktorima Saveznog ureda za civilno zrakoplovstvo Švicarske.

Posebno hvala mojoj obitelji i prijateljima na nesebičnoj podršci tijekom studiranja.

Vjekoslav Sraga



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 9. 11. 2018.	Prilog
Klasa: 002-04/18-6/3	
Ur.broj: 15-1703-18-388	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vjekoslav Sraga**

Mat. br.: 0035191423

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Unaprijeđeni model izračuna emisija na temelju tipičnih zapisa o letu**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Improved model for calculation of emissions based on typical flight records**

Opis zadatka:

Zadnjih godina iznimna se pažnja posvećuje emisijama štetnih tvari u okoliš iz raznih antropogenih izvora. Dok se za cestovna vozila redovito ažuriraju strogi zahtjevi, neka su područja praktički neistražena i vrlo slabo razvijena. Kako je nemoguće mjeriti emisije štetnih tvari iz svih izvora, emisije se procjenjuju raznim metodama. Trenutno se emisije iz zrakoplova generalne avijacije procjenjuju osnovnom Tier 1 metodom – prema količini goriva stavljenog na tržište. U svrhu osuvremenjivanja metoda praćenja, analiza te naposljetku smanjenja emisija štetnih tvari, potrebno je omogućiti izradu procjena ukupnih emisija temeljenih na točnijim Tier 2 i Tier 3 metodama. Takve metode su znatno preciznije i omogućuju daljnji razvoj i istraživanje područja. Glavni zadatak je osmisliti napredni model temeljen na Tier 3 metodi kojim će se emisije računati iz postojećih i dostupnih podataka koji se bilježe kao zakonska obveza. Funkcionalnost modela treba dokazati na odabranom uzorku zrakoplova namijenjenih generalnoj avijaciji, ali s naglaskom na mogućnost jednostavnog proširenja na druge vrste zrakoplova.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- dati pregled trenutno korištenih metoda izračuna emisija štetnih tvari iz zrakoplova;
- eksperimentalnim istraživanjem i analizom korištenja zrakoplova generalne avijacije, odrediti tipični (prosječni) ciklus leta (trajanje faza i korištene snage u pojedinoj fazi);
- osmisliti napredni model (temeljen na metodi Tier 3) izračuna emisija štetnih tvari na temelju podataka koji se bilježe kao zakonska obveza;
- u prikladnom programskom okruženju izraditi računalne interaktivne procedure za izračun emisija prema osmišljenom modelu;
- izrađene računalne procedure potrebno je primijeniti na dostupne karakteristične podatke i validirati model te omogućiti proširenje na proizvoljno odabranu vrstu i broj zrakoplova;
- izračunate rezultate potrebno je usporediti s rezultatima dostupnim u literaturi te donijeti odgovarajuće zaključke u smislu primjenjivosti razvijenog modela.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu diplomskoga rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

27. rujna 2018.

29. studenog 2018.

5., 6. i 7. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

## SADRŽAJ

Sadržaj.....	II
Popis slika .....	IV
Popis tablica .....	VI
Popis oznaka i kratica .....	VII
Sažetak .....	IX
Summary .....	X
1. Uvod.....	1
2. Emisije štetnih tvari .....	3
2.1. Akt za čisti zrak.....	4
2.2. Utjecaj štetnih tvari na zdravlje, okoliš i klimu .....	5
2.3. Podjela emisija štetnih tvari po vrsti izvora i procesu nastajanja .....	6
2.4. Staklenički potencijal .....	10
3. Generalna avijacija .....	12
3.1. Definicije.....	12
3.1.1. Zrakoplovi generalne avijacije .....	12
3.2. Broj isporučenih zrakoplova generalne avijacije .....	14
4. Pregled praćenja emisija štetnih tvari motora iz zrakoplova .....	16
4.1. Prva mjerenja emisija štetnih tvari iz zrakoplova .....	16
4.2. Značenje ciklusa slijetanja i polijetanja u analizi emisija štetnih tvari iz zrakoplova .....	16
4.3. Uobičajene definicije ciklusa .....	20
5. Postojeće metode procjena emisija .....	23
5.1. Tier 1 metoda .....	23
5.2. Tier 2 metoda .....	24
5.3. Tier 3 metoda .....	25
6. Emisijski faktori.....	27
6.1. Općenito o emisijskim faktorima .....	27
6.2. Dostupni emisijski faktori .....	28
6.2.1. Emisijski faktori za krstarenje .....	30
6.2.2. Emisijski faktori ugljikova dioksida .....	31
6.2.3. Emisijski faktori za Tier 1 metode .....	32
6.3. Usporedba dostupnih emisijskih faktora.....	33
7. Unaprijeđeni model procjene emisija štetnih tvari na temelju unosa jednostavnih podataka .....	41
7.1. Dnevnik letenja .....	42
7.2. Dodatni podaci .....	45
7.2.1. Udaljenosti između aerodroma.....	45

7.2.2.	Trajanje leta.....	50
7.3.	Opis Tier 3A modela.....	50
7.4.	Model u programu <i>Excel</i> .....	53
7.4.1.	Ulazni podaci .....	53
7.4.2.	Podjela trajanja leta na faze.....	55
7.4.3.	Izračun emisija štetnih tvari .....	56
7.4.4.	Prikaz rezultata.....	58
7.5.	Opis Tier 3B modela .....	59
7.5.1.	Podaci o putanji leta zrakoplova .....	59
7.6.	Model u programu <i>Excel</i> .....	61
7.6.1.	Određivanje režima rada motora zrakoplova .....	62
7.6.2.	Učitavanje preostalih podataka .....	63
8.	Rezultati i usporedba .....	64
8.1.	Metoda izračuna i usporedbe rezultata.....	64
8.2.	Let 1 .....	64
8.2.1.	Tier 3A model izračuna za Let 1 .....	64
8.2.2.	Tier 3B model izračuna za Let 1 .....	68
8.2.3.	Tier 1 model izračuna za Let 1 .....	72
8.2.4.	Usporedba triju modela za Let 1 .....	72
8.3.	Let 2 .....	74
8.3.1.	Tier 3A model izračuna za Let 2 .....	74
8.3.2.	Tier 3B model izračuna za Let 2 .....	77
8.3.3.	Tier 1 model izračuna za Let 2.....	81
8.3.4.	Usporedba triju modela za Let 2 .....	81
8.4.	Let 3 .....	83
8.4.1.	Tier 3A model izračuna za Let 3 .....	83
8.4.2.	Tier 3B model izračuna za Let 3 .....	86
8.4.3.	Tier 1 model izračuna za Let 3.....	90
8.4.4.	Usporedba triju modela za Let 3 .....	90
8.5.	Rasprava.....	92
9.	Zaključak .....	95
10.	Literatura.....	96

## POPIS SLIKA

Slika 1. Raspodjela emisija CO <sub>2</sub> ovisno o izvoru [2] .....	3
Slika 2. Vremenski tijek pravnih akata .....	4
Slika 3. Podjela inventara emisija na sektore, kategorije, i potkategorije.....	8
Slika 4. Nastanak emisija u motoru s unutarnjim izgaranjem [12] .....	9
Slika 5. Raspodjela emisija izgaranja u motoru s unutarnjim izgaranjem, prema [13].....	10
Slika 6. Dijagram utjecaja zračenja kroz vrijeme u godinama [15] .....	11
Slika 7. Cessna 172 "Skyhawk" .....	13
Slika 8. Tipični predstavnici i načini eksploatacije u generalnoj avijaciji .....	13
Slika 9. Isporučka i ukupna cijena generalnih zrakoplova u svijetu po godinama [23] .....	14
Slika 10. Raspodjela isporučenih zrakoplova prema vrsti motora, prema [23] .....	15
Slika 11. Tipičan LTO ciklus zrakoplova [25].....	17
Slika 12. Grafička usporedba triju metoda procjene emisija .....	26
Slika 13. Primjer statičkog mjerenja emisija na tlu [28] .....	27
Slika 14. Primjer emisijskih faktora za NO <sub>x</sub> , prema [28].....	35
Slika 15. Utjecaj faktora zraka $\lambda$ na emisiju štetnih ispušnih plinova, snagu i specifičnu potrošnju goriva te na potreban oktanski broj [47] .....	36
Slika 16. Usporedba emisijskih faktora za NO <sub>x</sub> , u pojedinom režimu rada.....	36
Slika 17. Primjer emisijskih faktora za CO .....	37
Slika 18. Usporedba emisijskih faktora za CO, u pojedinom režimu rada .....	38
Slika 19. Primjer emisijskih faktora za HC .....	38
Slika 20. Usporedba emisijskih faktora za HC, u pojedinom režimu rada .....	39
Slika 21. Utjecaj faktora zraka $\lambda$ na emisije štetnih ispušnih plinova bez i s katalizatorom [47] .....	40
Slika 22. Primjer ručno ispunjene Knjižice zrakoplova .....	43
Slika 23. Grafički prikaz podataka u modelu .....	51
Slika 24. Organizacija baze podataka .....	57
Slika 25. Korisnička shema unaprijeđenog modela izračuna.....	58
Slika 26. Prikaz rezultata pomoću interaktivnog dashboarda .....	59
Slika 27. Ukupni rezultat Tier 3A modela za Let 1 .....	66
Slika 28. Prikaz rezultata Tier 3A modela za Let 1 .....	67
Slika 29. Putanja zrakoplova prikazana na stranici FlightRadar24.....	68
Slika 30. Profil Leta 1 prema FlightRadar24 podacima.....	69
Slika 31. Ukupni rezultat Tier 3B modela za Let 1 .....	70

Slika 32. Prikaz kumulativnih rezultata Tier 3B modela za Let 1 .....	71
Slika 33. Ukupni rezultat Tier 1 modela za Let 1 .....	72
Slika 34. Usporedba rezultata Tier 1 modela za Let 1 .....	73
Slika 35. Ukupni rezultat Tier 3A modela za Let 2 .....	75
Slika 36. Prikaz rezultata Tier 3A modela za Let 2 .....	76
Slika 37. Putanja zrakoplova u Letu 2 prikazan na stranici FlightRadar24 .....	77
Slika 38. Profil Leta 2 prema FlightRadar24 podacima .....	78
Slika 39. Ukupni rezultat Tier 3B modela za Let 2 .....	79
Slika 40. Prikaz kumulativnih rezultata Tier 3B modela za Let 2 .....	80
Slika 41. Ukupni rezultat Tier 1 modela za Let 2 .....	81
Slika 42. Usporedba rezultata za Let 2 .....	82
Slika 43. Ukupni rezultat Tier 3A modela za Let 3 .....	84
Slika 44. Prikaz rezultata Tier 3A modela za Let 3 .....	85
Slika 45. Putanja zrakoplova u Letu 3 prikazana na stranici FlightRadar24 .....	86
Slika 46. Profil Leta 3 prema FlightRadar24 podacima .....	87
Slika 47. Ukupni rezultat Tier 3B modela za Let 3 .....	88
Slika 48. Prikaz rezultata Tier 3B modela za Let 1 .....	89
Slika 49. Ukupni rezultat Tier 1 modela za Let 3 .....	90
Slika 50. Usporedba rezultata za Let 3 .....	91



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija motora prema EPA standardima [4] .....	18
Tablica 2. Trajanje i snaga u pojedinim fazama LTO ciklusa [4] .....	18
Tablica 3. Trajanje i snaga u pojedinim fazama LTO ciklusa prema ICAO [26] .....	19
Tablica 4. ICAO i predloženi ciklus generalne avijacije.....	20
Tablica 5. Trajanje potpunog LTO ciklusa za zrakoplove s klipnim motorima [28].....	21
Tablica 6. Trajanje prilagođenih faza LTO ciklusa korištenih u ovom radu .....	21
Tablica 7. Prosječne vrijednosti emisijskih indeksa prema [8] .....	28
Tablica 8. Izvadak rezultata mjerenja s uključenim podacima za krstarenje [28] .....	30
Tablica 9. Emisijski faktori za ugljikov dioksid prema vrsti goriva .....	32
Tablica 10. Emisijski faktori aviobenzina prema IPCC [41], [42].....	32
Tablica 11. Emisijski faktori aviobenzina prema Izvješću nacionalnog inventara emisija Republike Hrvatske [43] .....	33
Tablica 12. Primjer vođenja Knjižice aviona (obveza organizacije/vlasnika zrakoplova) .....	44
Tablica 13. Primjer vođenja Dnevnika letenja (obveza pilota) .....	44
Tablica 14. Primjer matričnog zapisa udaljenosti aerodroma u kilometrima.....	46
Tablica 15. Broj aerodroma u RH prema vrsti prometa .....	46
Tablica 16. Geografska pozicija aerodroma u Republici Hrvatskoj .....	47
Tablica 17. Ulazni podaci modela.....	53
Tablica 18. Baza podataka o promatranoj floti zrakoplova .....	54
Tablica 19. Podaci u CSV datoteci preuzete s FlightRadar24 stranice .....	61
Tablica 20. Kriteriji određivanja režima rada motora prema brini penjanja .....	62
Tablica 21. Ulazni podaci Leta 1 za Tier 3A model .....	65
Tablica 22. Dio ulaznih podataka za Tier 3B model za Let 1 .....	69
Tablica 23. Ulazni podaci Leta 2 za Tier 3A model .....	74
Tablica 24. Dio ulazni podataka za Tier 3B model za Let 2 .....	78
Tablica 25. Ulazni podaci Leta 3 za Tier 3A model .....	83
Tablica 26. Dio ulaznih podataka za Tier 3B model za Let 3 .....	87

## POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
ADS-B		engl. <i>Automatic dependent surveillance - broadcast</i>
$AR_{fuel\ consumption}$	g	masa potrošenog goriva
BC		Crni ugljik
CCD		dio leta u krstarenju (engl. <i>Cruise Climb Descent</i> )
CH <sub>4</sub>		metan
CH <sub>4</sub> EF	g/kg <sub>goriva</sub>	emisijski faktor za metan
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> +S		pojednostavljena kemijska formula goriva
CO		ugljkov monoksid
CO <sub>2</sub>		ugljkov dioksid
CO <sub>2</sub> EF	g/kg <sub>goriva</sub>	emisijski faktor za ugljikov dioksid
CSV		engl. <i>Comma-separated values</i>
$d_{AB}$	km	udaljenost između aerodroma A i B
$EF_{pollutant}$	g/kg <sub>goriva</sub>	emisijski faktor promatrane tvari
EPA		Agencija za zaštitu okoliša SAD-a (engl. <i>U.S. Environmental Protection Agency</i> )
EUROCONTROL		Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe (engl. <i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i> )
$E_{pollutant}$	g	količina emisije promatrane tvari
FOCA		Federalni ured civilnog zrakoplovstva Švicarske (engl. <i>Federal Office of Civil Aviation</i> )
GAMA		Udruženje proizvođača generalne avijacije (engl. <i>General Aviation Manufacturers Association</i> )
GHG		Staklenički plin (engl. <i>Green House Gas</i> )
GWP		Staklenički potencijal (engl. <i>Global Warming Potential</i> )
H <sub>2</sub> O		voda
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		sumporna kiselina
HNO <sub>3</sub>		dušična kiselina
HOS		hlapivi organski spojevi
HZNS		Hrvatsko zrakoplovno nastavno središte
ICAO		Organizacija međunarodnog civilnog zrakoplovstva (engl. <i>International Civil Aviation Organization</i> )
IFR		instrumentalna pravila letenja (engl. <i>Instrument Flight Rules</i> )

IPCC		Međuvladin panel o klimatskim promjenama (engl. <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
IQ		kvocijent inteligencije
LTO		ciklus slijetanja i polijetanja (engl. <i>Landing and Take Off</i> )
$N_2+O_2$		pojednostavljena kemijska formula zraka
$N_2O$		didušikov oksid
$N_2O$ EF	g/kg <sub>goriva</sub>	emisijski faktor za didušikov oksid
$NH_3$		amonijak
NIR		Nacionalni inventar emisija (engl. <i>National inventory report</i> )
NMHOS		Nemetanski hlapivi organskih spojevi (engl. <i>Non-methane volatile organic compound</i> )
$NO_x$		dušikovi oksidi
$NO_x$ EF	g/kg <sub>goriva</sub>	emisijski faktor za dušikove okside
OC		organski ugljik
$R$	km	radijus Zemlje
$SO_2$		sumporov dioksid
$t_{CCD}$	s	trajanje CCD faze
$t_{LTO}$	s	trajanje LTO faze
$t_{total}$	s	trajanje lijeta
UHC		Neizgoreni ugljikovodici (engl. <i>Unburned Hydrocarbons</i> )
UNFCCC		Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime (engl. <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> )
$v_{climb_{AB}}$	ft/min	brzina penjanja zrakoplova
VFR		vizualna pravila letenja (engl. <i>Visual Flight Rules</i> )
VOC		engl. <i>Volatile Organic Compound</i>
$\lambda_A$		geografska dužina točke B
$\lambda_B$		geografska dužina točke B
$\varphi_A$		geografska širina točke A
$\varphi_B$		geografska širina točke B

## SAŽETAK

Emisije štetnih tvari prate se nacionalnim godišnjim inventarom emisija. Procijene emisija izvode se osnovnim ili naprednim metodama, ovisno o dostupnim podacima o aktivnostima izvora štetnih tvari. Emisije štetnih tvari iz motora zrakoplova generalne avijacije prate se osnovnim metodama isključivo na temelju podataka o prodaji goriva bez informacija o stvarnom načinu eksploatacije zrakoplova. U teorijskom dijelu predstavljena su trenutna dostignuća u ovom području te dostupni podaci koji se mogu koristiti za izračun emisija. Ulazni podaci uključuju informacije o aktivnosti i načinu upotrebe zrakoplova te dostupne emisijske faktore.

Ovim radom osmišljena su dva unaprijeđena modela prikupljanja i obrade podataka na temelju najviše razine (Tier 3) procjene emisija štetnih tvari. Modeli implementacijom u program *Excel* dosljedno i brzo automatski obrađuju veliki broj zapisa, a ulazni podaci mogu biti u obliku dnevnika letenja s osnovnim informacijama o letu ili zapis cijele putanje leta za detaljnije analize. Moguće je prilagoditi parametre u izračunu, a rezultati se prikazuju interaktivnim grafovima s mogućnošću naprednog filtriranja i sortiranja. Modeli su verificirani na 3 vrste letova, a rezultati su uspoređeni s osnovnim modelom procjene emisija štetnih tvari.

Ključne riječi: emisije štetnih tvari, generalna avijacija, motori s unutarnjim izgaranjem, *big data*, model procjene emisija

## SUMMARY

Accounting of pollutants discharged into the atmosphere is done by national yearly emission inventory. Emissions are estimated by basic or advanced methods, which depends on available activity data of emission sources. Emissions from the general aviation aircraft are estimated only by basic methods which estimate emissions from fuel consumption without additional information on actual usage of the aircraft. The theoretical section presents current achievements in this area and available data which can be used to calculate emissions. Input data include information on the activities and mode of operation of the aircraft and available emission factors.

This work includes two improved models for the data collection and analysis based on the highest level of the emissions estimation (Tier 3). Models are implemented in *Excel* program which consistently and quickly process a large number of records, and input data can be in the form of the flight logs with basic flight information or a record of the entire flight path for more detailed analysis. In *Excel* program, it is possible to customize the parameters of the calculation and results are displayed in an interactive graphs with advanced filtering and sorting capabilities. Models are verified on 3 types of flights and the results are compared with the basic model of emissions estimation.

Keywords: emissions of air pollutants, general aviation, internal combustion engines, *big data*, model of emissions estimation

## 1. UVOD

U zadnjih dvadesetak godina, od potpisivanja Protokola iz Kyota 1997. godine, mnogo se pažnje posvećuje emisijama štetnih tvari u okoliš iz raznih antropogenih izvora. Cilj za 2020. godinu je smanjenje stakleničkih plinova na razine 20 % niže od razina 1990. godine. Dok se, primjerice, za cestovna vozila redovito ažuriraju strogi zahtjevi i standardi, neka druga područja su neistražena i vrlo slabo razvijena. Jedno od njih su emisije štetnih plinova iz zrakoplova s klipnim motorima. Emisije stakleničkih plinova međunarodne avijacije su po prvi puta u 2015. godini prerasle emisije međunarodne plovidbe vodama, a već u 2016. godini, razlika je iznosila 2 milijuna tona ekvivalenta ugljikova dioksida. Dakle komercijalno se zrakoplovstvo u sve većoj mjeri prati naprednim metodama, a tzv. generalna avijacija se prati na osnovni način. Kod izračuna i procjena emisija štetnih tvari u okoliš postoje 3 razine tih postupka. Zovu se Tier 1, Tier 2 i Tier 3.

Prvim i najjednostavnijim Tier 1 metodama emisije se procjenjuju na temelju stvarne potrošnje goriva i uprosječenim emisijskim faktorima za cijelu promatranu skupinu. Korišteni prosjek kod zrakoplova uključuje razne tipove zrakoplova i pripadajućih motora te se oni kod izračuna ne uzimaju u obzir. Točniji rezultati s uključenim različitim vrstama izvora unutar sektora dobivaju se primjenom Tier 2 metoda koje uz potrošeno gorivo razlikuju i tipove zrakoplova.

Najsloženije metode su Tier 3 metode koje se dodatno dijele na A i B grupe. U grupi A, informacije o potrošenom gorivu i tipu zrakoplova nadopunjuju se podatkom o polaznom i odredišnom aerodromu. Tako se dobiva osnovna informacija o putanji zrakoplova odnosno o prijednom putu što predstavlja osnovni podatak o aktivnosti izvora emisija. Budući da zrakoplovi na različitim aerodromima ne provode isto vrijeme, Tier 3A metodom moguće je modelirati i rad motora na zemlji prije i nakon leta. Najkompletniji izvor podataka o aktivnosti pojedinog zrakoplova je zapis kompletne putanje zrakoplova u letu. Osim prostorne pozicije zrakoplova, takvim zapisima se bilježi i vrijeme provedeno u letu, brzina leta, a često i drugi podaci. Izvori takvih zapisa su tzv. crne kutije zrakoplova s najvećim brojem praćenih parametara i radarski zapisi s nešto manje praćenih parametara. Sličan javno dostupan servis praćenja zrakoplova, nalik radarima kontrole leta, pružaju Internet stranice od kojih je najpoznatija stranica *FlightRadar24*.

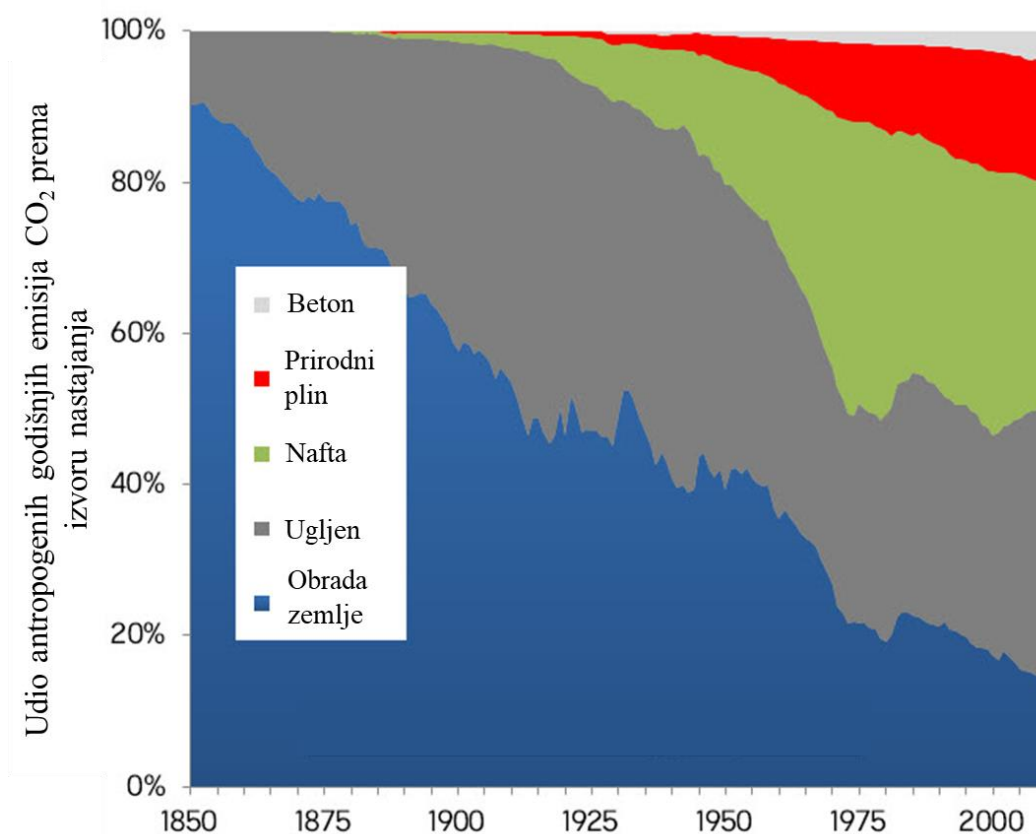
U većini država Europske unije, emisije se prate Tier 1 metodama. Zbog toga je u 2013. i 2014. godini revizorski tim preporučio da bi Republika Hrvatska trebala poboljšati preciznost i

transparentnost izvještavanja u inventaru emisija štetnih tvari kako bi se dobile stvarne brojke o raspodjeli goriva za domaće i međunarodne letove. Dvama projektima u 2014. i 2015. godini uspjelo se poboljšati načine utvrđivanja raspodjele goriva, no emisije štetnih tvari i dalje se računaju Tier 1 metodama [1]. Nadalje, Republika Hrvatska je jedina EU članica koja ne koristi emisijske faktore specifične odnosno prilagođene za pojedinu državu.

Sve države članice Europske unije članice su Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime. Članstvo u Konvenciji obvezuje sve članice da uspostave, provode i traže načine unaprjeđenja nacionalnih inventara emisija. U svrhu osuvremenjivanja metoda praćenja, analiza te naposljetku ograničenja emisija štetnih tvari, potrebno je osmisliti napredne načine prikupljanja ulaznih podataka i metode za njihovu obradu tako da se procjene emisija mogu temeljiti na Tire 2 i Tier 3 metodama. Tier 2 i Tier 3 metode su znatno preciznije i omogućuju daljnji razvoj i istraživanje, a razvojem novog modela nastojati će se pokazati da ih je moguće primijeniti iz već postojećih i dostupnih podataka.

## 2. EMISIJE ŠTETNIH TVARI

Emisije štetnih tvari smatraju se jednim od najznačajnijih problemom suvremenog doba. Svakodnevno se mogu pročitati razni članci i informacije o problemu očuvanja zdravlja, okoliša i klime. Emisije štetnih tvari u predindustrijskom dobu bile su posljedica prirodnih reakcija u procesima biljaka i životinja. Zahvaljujući brojnim prirodnim mehanizmima, emisije štetnih tvari kompenzirale su se obratnim procesima i tako su se razine štetnih tvari u zraku, vodama i tlu održavale na približno konstantnim vrijednostima. Međutim, naglim razvojem industrije i tehnologije, došlo je do znatno većih količina emisija uzrokovanih načinom života čovjeka tako da su 1967. godine emisije od obrade zemlje pale na drugo mjesto, iza korištenja nafte ili ugljena na prvom mjestu. Istovremeno su ukupne emisije nastavile eksponencijalni rast [2]. Slika 1. prikazuje kretanje udjela antropogenih emisija CO<sub>2</sub> prema izvoru nastajanja.



Slika 1. Raspodjela emisija CO<sub>2</sub> ovisno o izvoru [2]

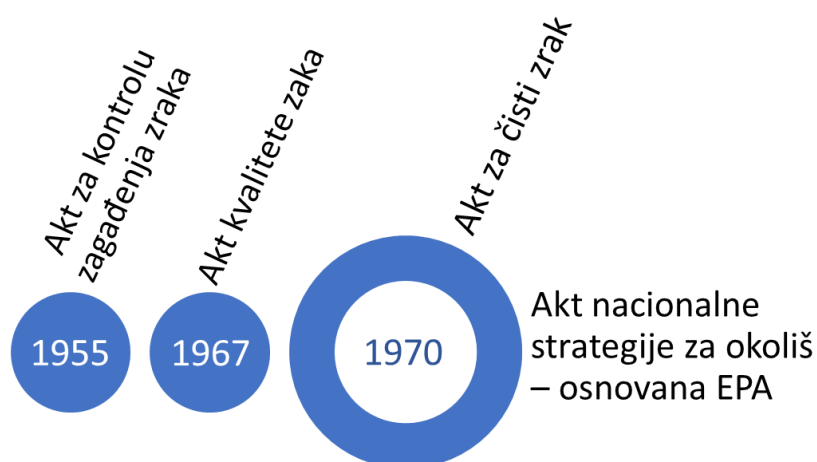
U isto vrijeme, razvoj tehnologija i metoda praćenja, analiziranja i smanjenja emisija kasnio je za razvojem izvora štetnih tvari. Tako je tek 1955. godine donesen prvi Akt za kontrolu zagađenja zraka (engl. *Air Pollution Control Act*) kojim se pokrenula opsežna analiza utjecaja emisija štetnih tvari na okoliš te su po prvi puta pokrenute mjere s ciljem očuvanja čistog zraka.



## 2.1. Akt za čisti zrak

Prvi poznati propis u kojem je uključena problematika onečišćenja zraka je Akt za kontrolu zagađenja zraka. Donesen je 1955. godine na saveznoj razini u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD). To je bio temelj prvim istraživanjima onečišćenja zraka. Nakon približno osam godina, kada je područje u dovoljnoj mjeri bilo istraženo, donesen je Akt za čisti zrak koji je, osim praćenja i istraživanja, po prvi puta uključio i mehanizme za kontrolu onečišćenja zraka. Kako bi se proširile aktivnosti saveznih vlasti, 1967. godine je donesen Akt kvalitete zraka (engl. *Air Quality Act*). Na temelju toga zakona, savezna je vlada po prvi puta provela opsežne studije praćenja zraka u okolišu te je ujedno provela prve nadzore nad stacionarnim izvorima. Nadalje, navedeni zakon omogućio je izradu prvih inventara emisija te studija o tehnikama praćenja stanja zraka i tehnikama kontrole emisija štetnih tvari.

Prikupljeni podaci, korišteni modeli i stečeno iskustvo u razdoblju od 1955. do 1970. godine rezultirali su Aktom za čisti zrak (engl. *Clean Air Act, CAA*) proglašenim 1970. godine koji je donio preokret u ulozi savezne vlade SAD-a kao odgovornog tijela za kontrolu onečišćenja zraka. Po prvi puta se pravno omogućio razvoj savezne i državne regulative za ograničavanje emisija štetnih tvari iz stacionarnih ili industrijskih izvora te iz mobilnih izvora. U približno isto vrijeme donesen je Akt nacionalne strategije za okoliš (engl. *National Environmental Policy Act*) kojim je osnovana Agencija za zaštitu okoliša Sjedinjenih Američkih Država (engl. *U.S. Environmental Protection Agency, EPA*) [3]. Spomenute pravne akte prema vremenu donošenja prikazuje slika 2.



Slika 2. Vremenski tijek pravnih akata

Među brojnim izvorima onečišćenja u tom zakonskom aktu, spomenuti su i zrakoplovi u smislu zahtjeva za administratora EPA-e za uspostavom standarda primjenjivih na bilo koje

zrakoplove ili zrakoplovne motore koji pridonose ili koji bi mogli pridonositi ili biti uzrokom onečišćenja zraka koje ugrožava javno zdravstvo i opće dobro. Kako bi se to omogućilo, EPA je prvotno trebala provesti studiju i istraživanje o emisijama štetnih tvari iz zrakoplova kako bi utvrdila u kojoj mjeri takve emisije utječu na kvalitetu zraka i tehnološku izvedivost kontrole takvih emisija. U provedenim istraživanjima, zaključeno je da emisije iz zrakoplova značajnije utječu na koncentracije ugljikova monoksida (CO), neizgorijelih ugljikovodika (HC) i dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) u zraku [4]

## 2.2. Utjecaj štetnih tvari na zdravlje, okoliš i klimu

Osnovni razlog za praćenje, analiziranje i smanjenje emisija su razni negativni učinci pojedinih emisija na zdravlje, okoliš i klimu. Mehanizmi djelovanja štetnih tvari su zakiseljavanje, eutrofikacija, fotokemijsko zagađenje, smanjenje kvalitete zraka, oštećenje i prljanje zgrada i drugih građevina te izloženost ljudi i ekosustava opasnim tvarima [5]. Ti mehanizmi imaju vrlo širok negativni utjecaj koji se očituje kroz ekološke posljedice klimatskih promjena, kao što su ekstremni valovi vrućine, povišenje razine mora, promjene u padalinama koje uzrokuju poplave i suše, intenzivni uragani i smanjena kvaliteta zraka, direktno ili indirektno utječu na fizičko, društveno i psihološko zdravlje ljudi.

Sastav i kvaliteta zraka najčešće uzrokuju bolesti dišnih puteva, respiratorne alergije i astmu. Klimatske promjene utječu na kvalitetu zraka na više načina među kojima prednjače nastajanje i pojačavanje utjecaja alergena i povećanje koncentracije ozona, čestica i prašine u zraku. Ozon i čestice pri tlu mogu uzrokovati bolove, kašljanje, iritaciju grla, zagušenje te upalu i smanjenje funkcije pluća. Povećane koncentracije ugljikova dioksida i ozona te posljedično povećanje temperatura utječe na distribuciju aeroalergena te pojačava alergnost peludi i plijesni. Povećanje količine padalina uzrokuje povećanje broja spora plijesni, dok česte suše dobrinose količini prašine i čestica u zraku. Nadalje, onečišćenje zraka doprinosi i povećanju malignih oboljenja. Nakon intenzivnih kiša ili poplava, pojačava se izloženost toksičnim kemikalijama, a to zajedno s padom kvalitete zraka i povišenim koncentracijama određenih onečišćujućih tvari pridonosi razvoju raka pluća. Smanjenje ozona u stratosferi pojačava temperature i izloženost UV zrakama što doprinosi razvoju raka kože i drugih kožnih oboljenja. Na kardiovaskularne bolesti i poremećaje utječu nagle i visoke promjene temperatura čemu se stariji ljudi, djeca i kronični bolesnici teže prilagođavaju. Povećane koncentracije ozona u nižim slojevima atmosfere otežavaju plućnu izmjenu zraka i time otežavaju rad srca, zajedno s česticama u zraku

koje uz to uzrokuju vensku trombozu, plućne embolije i disfunkciju krvnih žila. Stres i anksioznost uzrokovani ekstremnim vremenskim pojavama također doprinose zastoju srca i kardiomiopatiji. Teški metali poput žive i olova negativno utječu na razvoj fetusa i mogu uzrokovati smanjenje kvocijenta inteligencije (IQ-a). Osim navedenih, važno je spomenuti i druge probleme uzrokovane klimatskim promjenama, među kojima su bolesti koje se prenose hranom zbog zagađenog tla i uporabe velikih količina pesticida kako bi bilje ostalo otporno na teške vremenske i klimatske uvjete. Slično je i s bolestima koje se prenose onečišćenim i sve toplijim vodama te životinjama [6].

Osim emisija štetnih tvari na manjim visinama kojima pripadaju i zrakoplovi u početnim i završnim fazama leta, velik utjecaj na koncentracije štetnih tvari pri tlu imaju i emisije štetnih tvari iz faze krstarenja mlaznih zrakoplova. Procjenjuje se da se oko 8000 preranih smrti godišnje može pripisati emisijama iz zrakoplova u krstarenju, odnosno oko 10 000 cijeloj avijaciji. Dominantan utjecaj na smrtnost imaju sekundarni aerosoli, poput sumporne kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), dušične kiseline ( $\text{HNO}_3$ ) i amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) te nominalnog crnog ugljika (engl. *nominate black carbon*, BC) i čestičnog organskog ugljika (engl. *particulate organic carbon* (OC) Pod pojmom crni ugljik smatraju se čestice ugljika u atmosferi koje jako apsorbiraju sunčevu svjetlost pa daju čađi u zraku crnu boju. Apsorpcija sunčevog zračenja zagrijava čestice ugljika kojima raste temperatura i tako zagrijavaju okolni zrak. Ako dospiju na snijeg i led, svojim zagrijavanjem ubrzavaju njihovo topljenje. Čestice crnog ugljika egzistiraju od jednog do četiri tjedna u atmosferi, tako da mjere smanjenja pokazuju brze rezultate, a djelovanje na klimu je do regionalnih razmjera [7]. Za razliku od crnog ugljika, čestice organskog ugljika u atmosferi raspršuju sunčevo zračenje i tako sprečavaju zagrijavanje atmosfere. Slično kao i čestice crnog ugljika, također brzo nestaju iz atmosfere jer reagiraju s kisikom i tvore ugljikov dioksid [1].

Dugotrajna izloženost česticama aerodinamičkog promjera manjeg od  $2,5\text{ }\mu\text{m}$  također utječe na zdravlje i uzrokuje preranu smrtnost. Dodatni problem s emisijom dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) iz zrakoplova je što doprinose oksidaciji sumporovog dioksida ( $\text{SO}_2$ ) koji ne potječe iz zrakoplova no prisutan je u zraku iz drugih izvora [8].

### 2.3. Podjela emisija štetnih tvari po vrsti izvora i procesu nastajanja

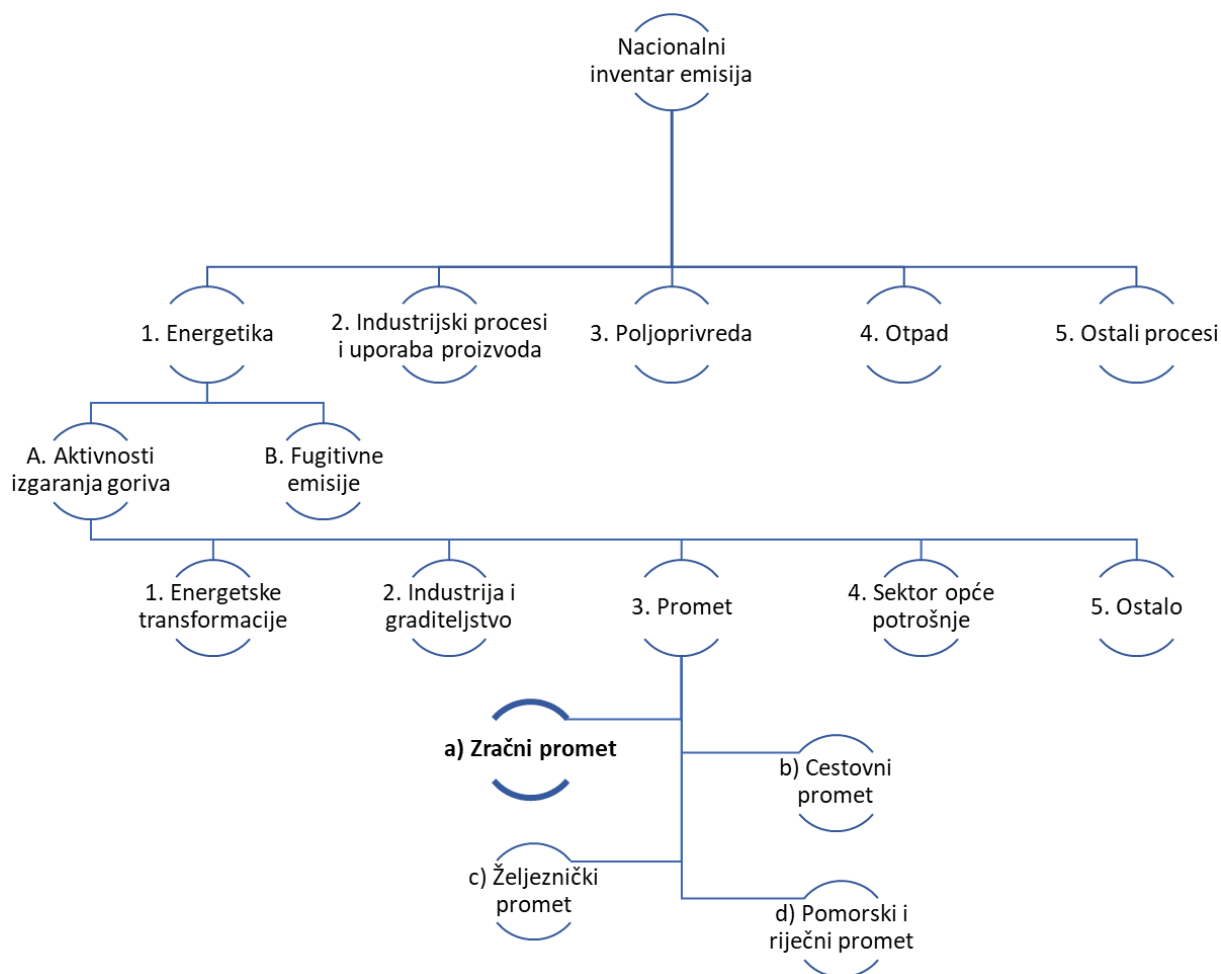
Podaci o cjelokupnim emisijama jedne zemlje objedinjuju se u Izvješću o inventaru stakleničkih plinova (engl. *National inventory report*, NIR). Inventar stakleničkih plinova izrađuje se svake

godine prema međunarodno prihvaćenim pravilima. U njemu su navedene emisije stakleničkih plinova, i to prvenstveno ugljikova dioksida. Ostale štetne tvari navedene su preko stakleničkog potencijala kojim se utvrđuje utjecaj na efekt staklenika ekvivalentan ugljikovom dioksidu. (opširnije u poglavlju 2.4) Izvješće se izrađuje jednom godišnje, a prikazuje rezultate od 1990. godine do druge godine koja prethodi godini objavljivanja izvješća (n-2). Iz toga slijedi da je potrebno oko dvije godine da se izradi izvješće za pojedinu godinu, no važno je napomenuti da se i rezultati prethodnih godina usklađuju sa svim korištenim metodama kako bi se jasno pratili trendovi emisija. Prema podacima iz inventara emisija utvrđuju se glavni izvori emisija i ocjenjuje se uspješnost upotrebe metoda smanjenja emisija [9].

U izvješćima o inventaru emisija, razlikuju se emisije štetnih tvari kao posljedica prirodnih aktivnosti i procesa te emisije kao posljedica aktivnosti čovjeka, tj. antropogene emisije. Emisije štetnih tvari se kod izrade inventara emisija razvrstavaju u sektore prema procesima i izvorima nastanka. Četiri glavna sektora su

- 1) Energetika,
- 2) Industrijski procesi i uporaba proizvoda,
- 3) Poljoprivreda
- 4) i Otpad.

Zadnji sektor čine (5) Ostali procesi i izvori koji ne pripadaju navedenim sektorima. Sektori se dalje dijele na kategorije i potkategorije. Emisije štetnih tvari iz sustava energije posljedica su iskorištavanja primarnih izvora energije, pretvorbe primarnih izvora energije u rafinerijama i energetske postrojenja u oblike prilagođene za široku upotrebu, prijenos i distribucija goriva te izgaranje goriva u stacionarnim i mobilnim izvorima [10]. Slika 3. prikazuje kojim kategorijama i sektorima pripadaju emisije štetnih tvari iz zrakoplova.



Slika 3. Podjela inventara emisija na sektore, kategorije, i potkategorije

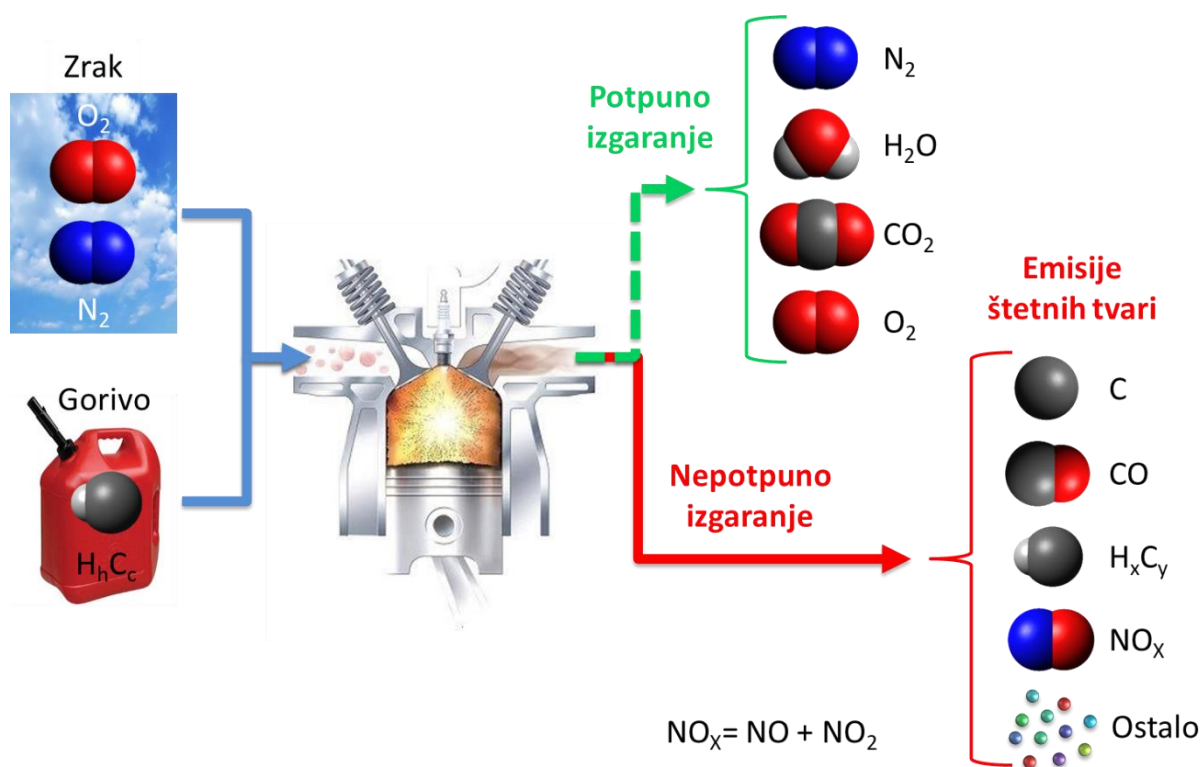
Sektor Energetika, iz kojeg se ispušta 78 % ukupnih emisija stakleničkih plinova (engl. *Green House Gas, GHG*) u Europskoj uniji i Islandu u 2016. godini [11], dijeli se na dvije kategorije, izgaranje i fugitivne emisije iz goriva. Potkategorija izgaranju je avijacija s oznakom 1.A.3.a i obuhvaća emisije iz svih zrakoplova što je i tema ovog rada [5].

Emisije štetnih tvari iz zrakoplova nastaju prvenstveno izgaranjem goriva u zrakoplovnim motorima.

„Prilikom potpunog izgaranja ugljik sadržan u gorivu oksidira i prelazi u ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) (...).  $\text{CO}_2$  je najvažniji staklenički plin koji nastaje prilikom izgaranja goriva. Emisija  $\text{CO}_2$  ovisi o kvaliteti i tipu goriva koje izgara. (...) Izgaranjem goriva dolazi i do emisija drugih stakleničkih plinova kao što su metan ( $\text{CH}_4$ ) i didušikov oksid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) te do emisija indirektnih stakleničkih plinova kao što su dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ), ugljikov monoksid ( $\text{CO}$ ) te nemetanski hlapivi organskih spojevi (NMHOS, engl. *Non-methane volatile organic compound, NMVOC*).

Indirektni staklenički plinovi utječu na proces stvaranja i razgradnje ozona, koji je također jedan od stakleničkih plinova. U okviru IPCC<sup>1</sup> metodologije predviđeno je i bilanciranje sumporovog dioksida (SO<sub>2</sub>), za koji se vjeruje, da kao prethodnik sulfata i aerosola negativno utječe na staklenički efekt jer se stvaranjem aerosola oduzima toplina atmosferi.“ [9]

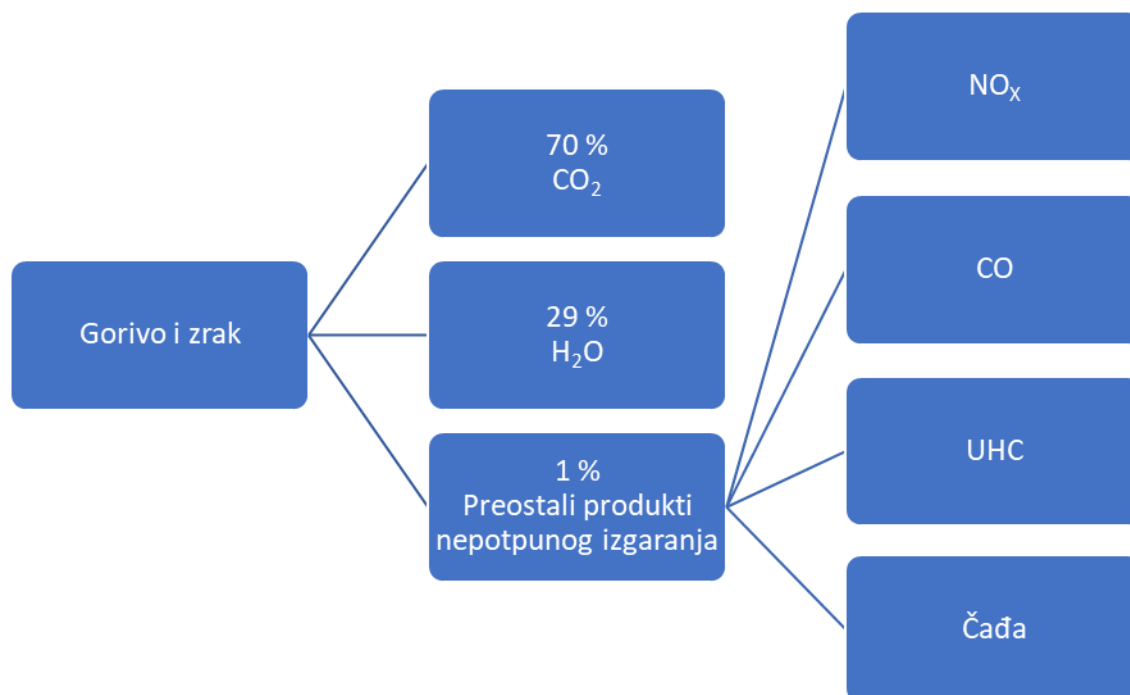
Prilikom izgaranja goriva, koje se kemijski označava kao smjesa ugljikovodika i sumpora, kao glavnih sastojaka (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>+S), ono kemijski reagira sa zrakom. Zrak za izgaranje uzima se iz okoliša, a glavni sastojci su mu dušik i kisik (N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>).



Slika 4. Nastanak emisija u motoru s unutarnjim izgaranjem [12]

Kemijskom reakcijom izgaranja nastaju produkti izgaranja, koji se sastoje od oko 70 % ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) te 29 % vode (H<sub>2</sub>O), a 1 % čine produkti nepotpunog izgaranja [13], a sastoje se od (dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>), ugljikovog monoksida (CO), neizgorenih ugljikovodika (UHC) i čađe [14].

<sup>1</sup> Međuvladin panel o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change*)



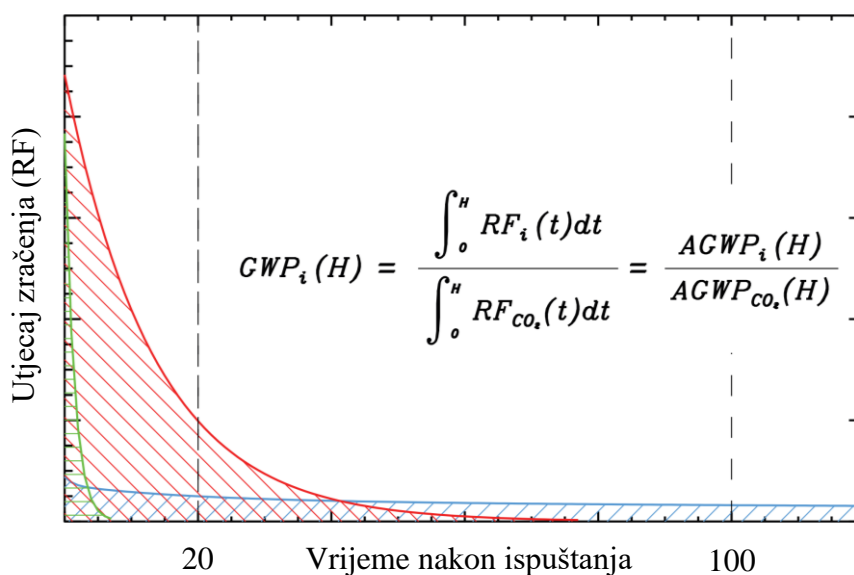
Slika 5. Raspodjela emisija izgaranja u motoru s unutarnjim izgaranjem, prema [13]

## 2.4. Staklenički potencijal

Za prikaz i analizu emisija štetnih tvari, nije praktično promatrati tako veliki broj različitih tvari. Ugljikov dioksid smatra se glavnim uzročnikom globalnog zatopljenja, budući da izgaranjem nastaje najviše ugljikova dioksida od svih produkata izgaranja. radi lakšeg uspoređivanja i određivanje utjecaja pojedine tvari na okoliš, ostale tvari je potrebno svesti tvari na ekvivalentnu vrijednost ugljikova dioksida radi lakšeg uspoređivanja i određivanje utjecaja pojedine tvari na okoliš. Pojedini staklenički plinovi imaju različita svojstva zračenja i zbog toga različito doprinose efektu staklenika. Zbog toga je za svaki plin određen staklenički potencijal (engl. *Global Warming Potential, GWP*) definiran kao mjera utjecaja nekog plina na staklenički efekt u odnosu na utjecaj CO<sub>2</sub>. Vrijednosti stakleničkog potencijala kreće se od 25 za metil bromid pa sve do nekoliko desetaka tisuća za spojeve s fluorom [9].

GWP se izravno može interpretirati kao indeks ukupno dodane energije klimatskom sustavu od promatrane tvari jednake energiji ugljikova dioksida. Apsolutna vrijednost stakleničkog potencijala računa se integriranjem utjecaja zračenja (engl. *Radiative Forcing*) po vremenu. Razdoblje može biti 20, 100 ili 500 godina, a prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*

usvojeno je mjerodavnih 100 godina koje se primjenjuju od 1997. godine [15]. Dijagram utjecaja zračenja i formulu izračuna stakleničkog potencijala prikazuje slika 6.



Slika 6. Dijagram utjecaja zračenja kroz vrijeme u godinama [15]

Crvenom bojom je označen CO<sub>2</sub>, a plavo i zeleno su tvari s vremenom poluraspada od 1,5 godine, odnosno 13 godina. Na kraju valja spomenuti da se najčešće koriste staklenički potencijali metana (CH<sub>4</sub>) – 25 i didušikovog oksida (N<sub>2</sub>O) – 265 [16].



### 3. GENERALNA AVIJACIJA

#### 3.1. Definicije

Prema Kanadskom rječniku za pilote i zrakoplovno osoblje generalnoj avijaciji pripadaju sve operacije civilnih zrakoplova koje nisu komercijalne zračne usluge ili zračni transport za koji se plaća naknada ili najam [17]. Za potrebe statistike Organizacije međunarodnog civilnog zrakoplovstva (engl. *International civil aviation organization, ICAO*), aktivnosti zrakoplova generalne avijacije dijele se na nekomercijalne poslovne letove, zračne radove, instrukcijske letove i letove za razonodu te ostale letove [18]. Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe (engl. *European Organisation for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL*) letove generalne avijacije dijeli na državne letove (koje proglašava država), instrukcijske letove, privatne letove, poslovne letove, letove za vuču jedrilica aerozapregom i za izbacivanje padobranaca [19]. Na takvim letovima uglavnom lete zrakoplovni s klipnim motorima i to je skupina na koju su ograničene analize u ovom radu. Takvim letovima se uglavnom bave i brojni aeroklubovi koji predstavljaju mjesto susreta ljudi uključenih u aktivnosti generalne avijacije. EUROCONTROL dodatno navodi tehnička slijetanja, probne letove, prelete zrakoplova te ostale nekomercijalne letove također kao operacije generalne avijacije, no jasno je da su to iznimke definirane za potrebe tih organizacija i one se uobičajeno ne smatraju generalnom avijacijom.

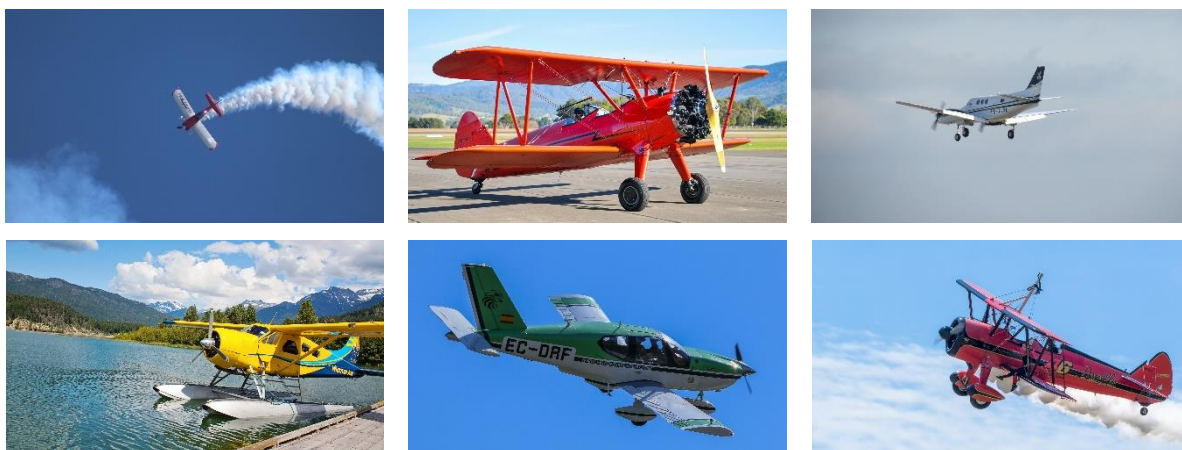
##### 3.1.1. Zrakoplovi generalne avijacije

Tipični predstavnik zrakoplova generalne avijacije je Cessna 172, koja je ujedno i najprodavaniji zrakoplov u svijetu s preko 43 000 isporučenih zrakoplova [20]. Cessna 172 „Skyhawk“ je četverosjed, visokokrilac, opremljena je propelerom fiksnog koraka i zrakoplovnim klipnim motorom, a prikazana je na slici 7.



*Slika 7. Cessna 172 "Skyhawk"*

Oko 230 000 zrakoplova koji u svijetu koriste aviobenzin [21], odnosno AVGAS 100 LL dokazuje da su upravo zrakoplovi s klipnim motorom valjani predstavnici skupine generalne avijacije te da ne čine zanemariv udio u ukupnom broju aktivnih zrakoplova. Slika 8. prikazuje tipične zrakoplove generalne avijacije s klipnim motorom.

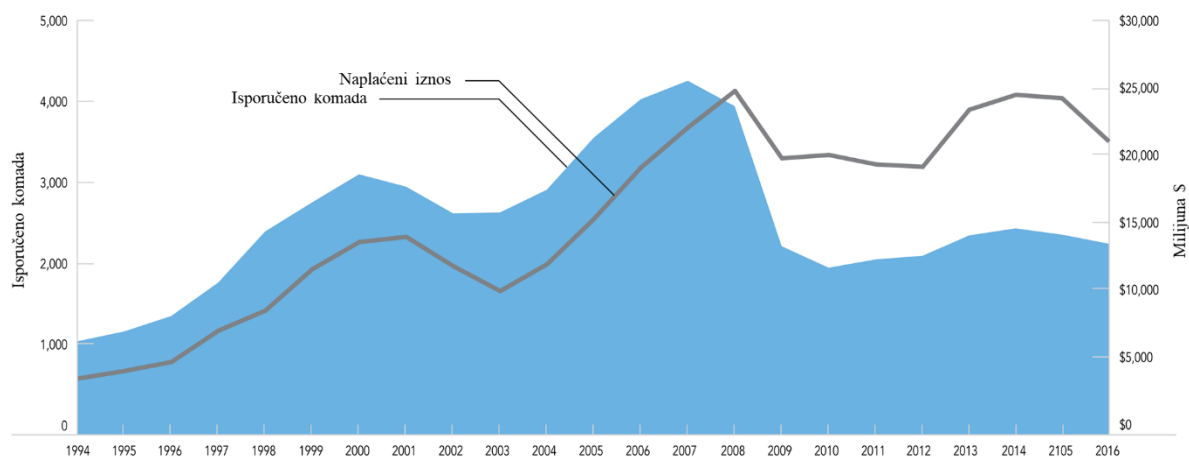


*Slika 8. Tipični predstavnici i načini eksploatacije u generalnoj avijaciji*

Broj mlazni komercijalnih zrakoplova znatno je manji, no oni zbog brzine leta i učestalog korištenja ostvaruju znatno veći nalet. Primjerice, 80 % IFR prometa u Europi u 2015. godini ostvarilo je 31 vrsta zrakoplova od kojih su svi turbinski putnički zrakoplovi. Među njima je 7 zrakoplova s turboelisnim motorima, a ostatak su turboventilatorski motori. Navedenih 31 zrakoplov predstavljaju malen udio od ukupno 546 identificiranih različitih tipova zrakoplova u 2015. godini u Europi [22].

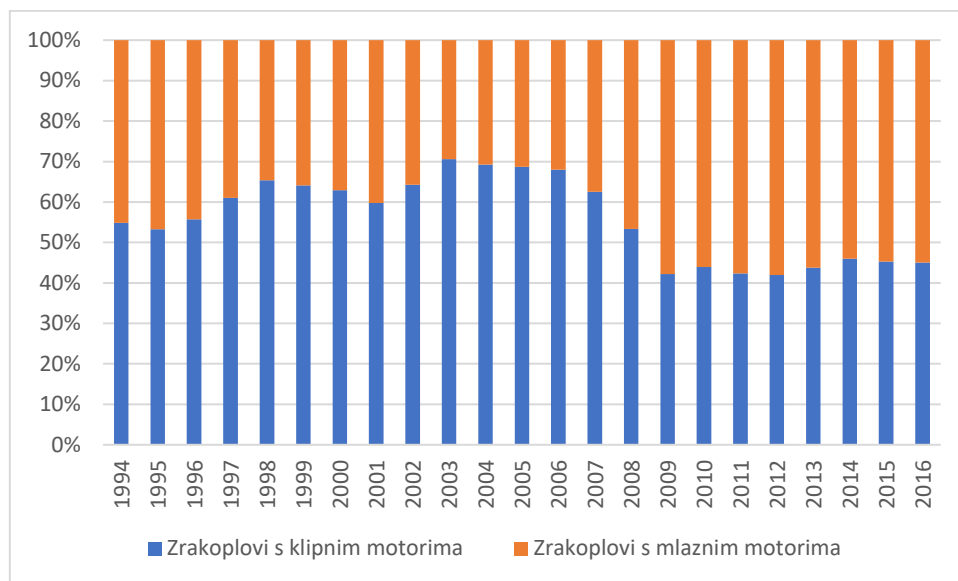
### 3.2. Broj isporučenih zrakoplova generalne avijacije

Što se tiče isporuke novih zrakoplova generalne avijacije, slika 9. prikazuje statistiku isporuke zrakoplova generalne avijacije od 1994. do 2016. prema podacima Udruženja proizvođača generalne avijacije (engl. *General Aviation Manufacturers Association, GAMA*)



Slika 9. Isporučka i ukupna cijena generalnih zrakoplova u svijetu po godinama [23]

Promatrajući trend kroz cijelo razdoblje, može se uočiti da naplata kasni za isporukom oko jednu godinu. Primjerice, maksimalan broj isporučenih zrakoplova je u 2007. godini, dok je najveća naplata ostvarena u 2008. godini. Nagli pad 2009. godine rezultat je globalne ekonomske krize. Prije krize, 2007. godine je dosegnut rekord u isporuci zrakoplova generalne avijacije te je iznosio 4 227 komada. Od tog broja, zrakoplova s klipnim motorom ili motorima isporučeno je 2 675, odnosno oko 63,3 %, što je prikazano slikom 10.



Slika 10. Raspodjela isporučenih zrakoplova prema vrsti motora, prema [23]

Već 2009. godine, broj isporučenih zrakoplova s klipnim motorom pao je na 963 komada i od tada se uspio povećati tek na 1019 komada u 2016. godini, a njihov udio u ukupnoj broju isporučenih zrakoplova generalne avijacije kreće se između 40 i 50 %. Pad broja isporučenih zrakoplova generalne avijacije s mlaznim motorom bio je manji za vrijeme krize, a zadnjih nekoliko godina se kreće oko 1250 komada godišnje. Može se zaključiti da se zrakoplovi s klipnim motorima i dalje proizvode u značajnoj količini, odnosno da ostvaruju nalet koji se ne može zanemariti u analizi emisija iz sektora avijacije.

## 4. PREGLED PRAĆENJA EMISIJA ŠTETNIH TVARI MOTORA IZ ZRAKOPLOVA

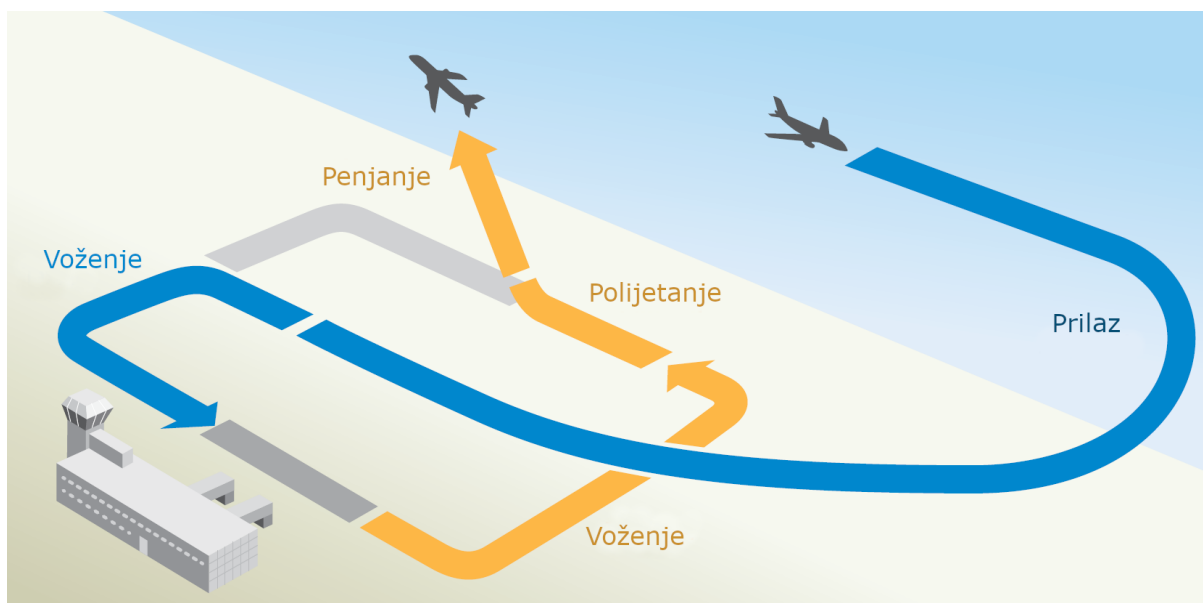
### 4.1. Prva mjerenja emisija štetnih tvari iz zrakoplova

Prije razmatranja mogućnosti smanjenja emisija štetnih tvari iz zrakoplova, potrebno je odrediti u kojoj mjeri zrakoplovi onečišćuju zrak i okoliš. Nizom studija u Sjedinjenim Američkim Državama željelo se obuhvatiti sve vrste zrakoplova i zrakoplovnih motora pa se provodilo mjerenje emisija štetnih tvari na najčešće korištenim zrakoplovnim motorima. Krajnji cilj je bio prikupiti i razviti pouzdani komplet podataka za sve zrakoplove uobičajeno korištene u Sjedinjenim Američkim Državama. Ispitivanja su provedena kroz 390 testova motora u 10 različitih laboratorija. Iako su se znanstvenici susreli s problemom izdržljivosti i integritetom sustava uzorkovanja i mjerenja, uspjeli su prikupiti opsežnu količinu podataka koje su zatim statistički analizirali i prezentirali kroz izvješće aeronautičkog laboratorija *Cornell* 1971. godine [24]. U navedenom izvješću prezentirane su analitičke procedure i tehnike procesiranja podataka kako bi se podaci s mjerenja sirovih emisija ispušnih plinova zrakoplova preračunali u oblik prilagođen potrebama donošenja realnih standarda. Budući da su se u ranije spomenutim istraživanjima ugljikov monoksid, ugljikovodici i dušikovi oksidi pokazali kao ispušni plinovi zrakoplova koji u najvećoj mjeri onečišćuju okoliš, njihovi maseni protoci mjereni su u ovim ispitivanjima. Važno je napomenuti kako su autori ovih istraživanja već u vrijeme pisanja spomenutog izvješća uvidjeli kako su zrakoplovi u to vrijeme činili mali udio u ukupnim emisijama štetnih tvari, no relativni udio u emisijama će u narednim godinama porasti. Za to su odgovorna dva uzroka. Prvi je kontinuiran razvoj tehnologije za smanjenje emisija štetnih tvari iz cestovnih vozila a drugi je ubrzan rast broja zrakoplova i broja operacija zrakoplova u sljedećim desetljećima. Mjerile su se emisije štetnih tvari iz komercijalnih, vojnih te zrakoplova generalne avijacije, a mjerenja su provedena tako da se iz rezultata moglo odrediti kolike su emisije štetnih tvari u različitim fazama jednog ciklusa uzlijetanja i slijetanja (engl. *Landing and Take Off cycle*, LTO).

### 4.2. Značenje ciklusa slijetanja i polijetanja u analizi emisija štetnih tvari iz zrakoplova

Let zrakoplova, u pravilu, počinje i završava u zračnoj luci ili nekoj drugoj prikladnoj površini za uzlijetanje i slijetanje. Dakle, svaki let se sastoji od barem nekoliko osnovnih dijelova ili faza. To su voženje (engl. *taxi*) prije uzlijetanja, uzlijetanje, penjanje, krstarenje, spuštanje,

prilaz (sa slijetanjem) i voženje nakon slijetanja. Pri analizi emisija, LTO ciklus definiran je slično za sve analize, a jedna od definicija je da su to sve operacije zrakoplova ispod visine leta od 914 metara (3000 stopa) koja je određena kao granica iznad koje se ne očekuje difuzija štetnih tvari prema dolje pa niti nema utjecaja na probleme s kvalitetom zraka [8].



Slika 11. Tipičan LTO ciklus zrakoplova [25]

Za potrebe analize iz 1971. godine, LTO ciklus s pripadajućim postavkama snage u određenim fazama leta određen je prema savjetima zrakoplovnih kompanija, operatera zrakoplova te Saveznih zrakoplovnih vlasti (engl. *Federal Aviation Administration, FAA*). U tu svrhu, 1971. godine su se motori prvotno klasificirali godine prema tadašnjim EPA standardima. Tako se u to vrijeme razlikovalo osam različitih vrsti motora koji se ugrađuju u zrakoplove (Tablica 1.).

Tablica 1. Klasifikacija motora prema EPA standardima [4]

Oznaka motora	Opis
T1	Turbomlazni / turboventilatorski motori s potiskom manjim od 35,6 kN (8000 lbf)
T2	Turbomlazni / turboventilatorski motori s potiskom većim od 35,6 kN (8000 lbf) (osim JT8D i JT3D)
T3	P&W JT3D
T4	P&W JT8D
T5	Turbomlazni / turboventilatorski motori za nadzvučne zrakoplove
P1	Klipni bokser motori
P2	Turboelisni motori
APU	Dodatne jedinice napajanja (engl. <i>Auxiliary Power Units, APU</i> )

Nakon toga, utvrđeni su tipični LTO ciklusi – s trajanjem pojedine faze i tipičnoj postavci snage pojedine vrste motora koja se koristi u promatranoj fazi. Tablica 2. prikazuje kako je definiran LTO ciklus za određene vrste motora prema izvješću iz 1971. godine [4].

Tablica 2. Trajanje i snaga u pojedinim fazama LTO ciklusa [4]

Faza leta zrakoplova	Klasa motora							
	T1, P2		T2, T3, T4		T5		P1	
	Vrijeme, min	Snaga, % vršne snage	Vrijeme, min	Snaga, % vršne snage	Vrijeme, min	Snaga, % vršne snage	Vrijeme, min	Snaga, % vršne snage
Voženje prije uzlijetanja	19	(1)	19	(1)	19	(1)	12	(1)
Uzlijetanje	0,5	100	0,7	100	1,2	100	0,3	100
Penjanje	2,5	90	2,2	85	2,0	65	5,0	(2)
Spuštanje	N/P	N/P	N/P	N/P	1,2	15	N/P	N/P
Prilaz	4,5	30	4,0	30	2,3	34	6,0	40
Voženje nakon slijetanja	7,0	(1)	7,0	(1)	7,0	(1)	4,0	(1)

(1) prema uputi proizvođača

U suvremenim izvještajima, kao što je Europski izvještaj utjecaja avijacije na okoliš (engl. *European Aviation Environmental Report*) iz 2016. godine kao referentni koristi se LTO ciklus Organizacije međunarodnog civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organization, ICAO*). Parametre toga ciklusa prikazuje Tablica 3.

Tablica 3. Trajanje i snaga u pojedinim fazama LTO ciklusa prema ICAO [26]

Faza leta zrakoplova	Vrijeme, min	Snaga, % vršne snage
Polijetanje	0,7	100
Penjanje	2,2	85
Prilaz	4,0	30
Voženje, ukupno	26	7

Važno je napomenuti kako navedeni parametri LTO ciklusa vrijede za turbomlazne i turboventilatorske motore potiska veće od 26,7 kN (6000 lbf) što predstavlja tipove motora koji se ugrađuju u suvremene poslovne i veće mlazne zrakoplove [25].

Usporedbom navedenih parametara ciklusa može se primijetiti da je referentni aktualni ICAO ciklus baziran na ciklusu iz 1971. godine s nešto izmijenjenim parametrima snage. Prema tome iako postoji definiran LTO ciklus za zrakoplove s klipnim motorima, može se pretpostaviti da je zastario te da ne odražava točne načine upotrebe zrakoplova generalne avijacije koji lete na vrlo raznolikim vrstama letova, tj. raznovrsnim brzinama leta, brzinama penjanja i spuštanja, režimima korištene snage i brzine vrtnje motora i pripadajućeg propelera itd. Za razliku od komercijalnih zrakoplova koji imaju ustaljene profile leta vrlo često osmišljene na način da budu najisplativiji, zrakoplovi generalne avijacije koriste se za školovanje pilota, panoramske letove, usluge prijevoza na različite destinacije, vuču jedrilica aerozapregom, izbacivanje padobranaca, mamaca za životinje itd. Dakle vrlo je nezahvalno odrediti prosječni LTO ciklus za takve zrakoplove, stoga se za preciznije račune preporuča napraviti analizu LTO ciklusa na određenom području ili u ograničenom vremenskom razdoblju, primjerice na mjesečnoj bazi, na bazi flote pojedinog operatera ili pak za područje oko jednog aerodroma ili za pojedinu državu.



### 4.3. Uobičajene definicije ciklusa

Obzirom da svaki let ima barem jedan LTO ciklus i njegov značaj za ovaj unaprijeđeni model izračuna emisija, potrebno je odrediti tipičan LTO ciklus promatranog uzorka zrakoplova. Zbog raznolikih načina letenja u generalnoj avijaciji, moguće je i klasificiranje različitih vrsta letova i, prema tome, određivanje više različitih LTO ciklusa. Tablica 4. prikazuje trenutačno ICAO LTO ciklus, modifikacije koje su potrebne da bi se ciklus prilagodio stvarnim uvjetima u generalnoj avijaciji te razlozi predloženih modifikacija.

Tablica 4. ICAO i predloženi ciklus generalne avijacije

ICAO LTO ciklus	GA RH LTO ciklus	Objašnjenje
< 914,4 m (3000 ft)	< 300 m (1000 ft)	klasa G zračnog prostora (nekontrolirana)
Trajanje pojedine faze	Provjeriti u drugim istraživanjima usredotočenima na generalnu avijaciju	Potrebno je prilagoditi trajanje stvarnim uvjetima
Snaga korištena u pojedinoj fazi	Provjeriti prema uputama proizvođača, praksi pilota i praćenjem letova	Potrebno je prilagoditi korištenu snagu stvarnim uvjetima

U Republici Hrvatskoj primjenjuju se klase C, D i G zračnog prostora prema ICAO podjeli. Od toga su klase C i D kontrolirane, a klasa G je nekontrolirana. Sportsko rekreativni zrakoplovi najčešće lete u navedenoj klasi G koja se u cijeloj državi proteže do 300 metara iznad terena, osim na području kontroliranih zračnih zona (engl. *controlled traffic region, CTR*) i zabranjenih područja. Također, visina aerodromskog prometnog kruga na aerodromu Lošinj iznosi oko 243 m (800 ft), a visina ulaska u kontrolirane zone gotovo svih aerodroma u Hrvatskoj iznos oko 300 m (1000 ft) iznad terena [27].

U tablici 5. prikazano je tipično trajanje pojedine faze LTO ciklusa za zrakoplove opremljenim klipnim motorima, a koje je korišteno u istraživanjima Švicarskog Federalnog ureda za civilno zrakoplovstvo. Budući da će se u ovom radu koristiti emisijski faktori izmjereni u istom istraživanju, predloženi LTO ciklus je usvojen za izračun s modifikacijom u vremenu penjanja i prilaza.

Tablica 5. Trajanje potpunog LTO ciklusa za zrakoplove s klipnim motorima [28]

Faza leta	Trajanje faze u minutama
Polijetanje	0,3
Penjanje	5
Prilaz	6
Voženje*	16

\*prije polijetanja i nakon slijetanja

Zbog ranije navedenog ograničenja G klase zračnog prostora na visinu do 300 m (1000 ft) iznad tla, pretpostavlja se da se veliki broj letova odvija do te visine. Navedeno trajanje faza vrijedi za LTO ciklus do 900 m (3000 ft), pa je potrebno vrijeme penjanja i prilaza prilagoditi manjoj visini.

Uobičajena brzina penjanja zrakoplova generalne avijacije je između 3,5 m/s (700 ft/min) do 7 m/s (1400 ft/min), pa se može pretpostaviti da će većina zrakoplova visinu od 300 m iznad terena postići za oko 2 minute. Razmjerno tome, brzina spuštanja se također može u redovitim operacijama pretpostaviti u sličnim vrijednostima, pa će se i vrijeme faze prilaza umanjiti. Budući da faza prilaza uključuje i slijetanje i voženje od uzletno sletne staze do vozne staze (rulnice), trajanje faze prilaza procjenjuje se na oko 3 minute. Konačno trajanje pojedinih faza LTO ciklusa prikazuje tablica 6.

Tablica 6. Trajanje prilagođenih faza LTO ciklusa korištenih u ovom radu

Faza leta	Trajanje faze u minutama
Polijetanje	0,3
Penjanje	2
Prilaz	3
Voženje	16

Kod letova u sklopu školovanja pilota (trenaže) često se izvodi tzv. slijetanje s produžavanjem, pri kojem zrakoplov iz faze slijetanja odmah nakon dodira s uzletno sletnom stazom prelazi u fazu polijetanja. Na taj način ostvaruje jedan ciklus, no u njemu nema faze voženja. Iz toga slijedi da se voženje izvodi samo na početku i kraju leta, odnosno jednom u letu neovisno o broju ciklusa. Zbog toga će unaprijedenim modelom morati razlikovati puni i djelomični LTO

ciklus kako ne bi došlo do značajnih odstupanja u rezultatu. Na kraju valja napomenuti da će se modelom omogućiti variranje trajanja pojedinih faza LTO ciklusa što će dodatno proširiti mogućnosti upotrebe unaprijedenog modela u složenim analizama.

## 5. POSTOJEĆE METODE PROCJENA EMISIJA

Praćenje emisija štetnih tvari u okoliš iz velikog broja izvora ne može se egzaktno izmjeriti. Razlog tomu su najčešće velika brojnost izvora i složen postupak mjerenja. Zbog toga se mjerenja provode laboratorijski ili na manjem broju primjeraka, a dobiveni rezultati se raznim metodama ekstrapoliraju na cijelu skupinu ili sektor izvora. Pritom valja naglasiti da metode predstavljaju smišljeno i plansko postupanje pri radu [29]. Svim metodama je zajedničko da analiziraju podatke koje predstavljaju aktivnost promatranog izvora (engl. *activity data*). Prikupljeni podaci se analiziraju uporabom provjerenih alata pri čemu se koriste obrađeni podaci iz drugih istraživanja, kao na primjer emisijski faktori koji se izražavaju kao emitirana količina određene štetne tvari u jedinici vremena, po jedinici potrošenog goriva ili jedinici udaljenosti. U sklopu pojedinih metoda razvijeni su razni modeli kojima se primjenjuju različiti obrasci i načini obrade dostupnih podataka s ciljem poboljšanja točnosti, preciznosti i opsežnosti podataka. Od brojnih metoda koje su razvijene, mogu se izdvojiti tri najbitnije skupine koje se razlikuju po pristupu rješavanja problema. Procijene emisija se u osnovi uvijek svodi na umnožak prikladnih emisijskih faktora s prikupljenim podacima o aktivnosti promatranog izvora.

### 5.1. Tier 1 metoda

Najjednostavnija metoda procjene emisija štetnih tvari naziva se skupnim imenom Tier 1 metoda. Osnovno obilježje Tier 1 metode je izračun emisija na temelju emisijskih faktora izraženih po jedinici mase goriva. Iz podataka o prodaji goriva računaju se emisije štetnih tvari bez analize i podataka o stvarnom načinu korištenja goriva, odnosno letu zrakoplova koji koriste to gorivo. Takve analize su jednostavne i brze, no upitne su točnosti i obuhvatnosti. Pri tome je važno razlikovati i emisije unutar zemlje i međunarodne emisije. Dakle, za Tier 1 metode podaci o aktivnosti čine podaci o prodaji goriva uz pretpostavku da je količina prodanog goriva jednaka iskorištenoj količini goriva. Ukupne količine potrebno je podijeliti na domaću i međunarodnu upotrebu. Metoda podjele je jednostavna, a provodi se tako da se uspoređuju jesu li polazni i odredišni aerodrom u istoj državi. Ti podaci najčešće nisu dostupni kod Tier 1 metoda pa se ta podjela zanemaruje, odnosno kod zrakoplova generalne avijacije uobičajeno je pretpostaviti da se sva količina goriva koristi za domaće letove. Za Republiku Hrvatsku takav pristup može negativno utjecati na točnost rezultata, budući da zbog razvijenog turizma na određenim aerodromima zrakoplovi generalne avijacije iz drugih država čine znatan udio, a

može se pretpostaviti da s razvojem turizma raste i broj međunarodnih odlazaka i dolazaka zrakoplovima generalne avijacije. U prilog tomu ide podatak da je „primarna orijentacija Zračnog pristaništa Lošinj generalno zrakoplovstvo (66 % svih putnika 2010. godine otpada na generalno zrakoplovstvo)“ [30].

Ako je dostupno iz statističkih podataka, poželjno je i prikupiti ukupan broj LTO ciklusa isto tako za domaće i međunarodne letove. Na podatke o aktivnosti primjenjuju se opći emisijski faktori koji predstavljaju prosječne podatke za cijelu flotu jedne zemlje. Emisijski faktori izražavaju se prema masi potrošenog goriva i ne uključuju podatke o načinu uporabe goriva, primjerice fazama leta ili režima rada koji značajno utječu na emisije, što je prikazano u poglavlju 6. u kojem su analizirani emisijski faktori. Nadalje, podjela između LTO i dijela leta u fazi krstarenja (CCD, engl. *Cruise Climb Descent*) ne izvodi se ili se za to također primjenjuju poopćeni faktori. Opća formula izračuna Tier 1 metodu je

$$E_{pollutant} = AR_{fuel\ consumption} \times EF_{pollutant} \quad (1)$$

pri čemu je  $E_{pollutant}$  ukupna količina emisije štetne tvari,  $AR_{fuel\ consumption}$  je količina potrošenog goriva koji predstavlja pojednostavljeni podatak o aktivnosti (engl. *Activity Rate*), a  $EF_{pollutant}$  je emisijski faktor određene tvari. Ukupno gorivo sastoji se od goriva korištenih za LTO fazu te goriva korištenog za CCD fazu. Pri tome se kod primjene Tier 1 metode pretpostavlja da količina LTO goriva odgovara umnošku broja LTO ciklusa i količine goriva za pojedini ciklus (ako su ti podaci dostupni), a ostatak se pretpostavlja da pripada CCD fazi, no podjela se u aktualnim inventarima emisije ne navodi.

## 5.2. Tier 2 metoda

Osnovno poboljšanje Tier 2 metoda u odnosu na Tier 1 metode je proširenje prikupljanja podataka, a time i rezultata na razne LTO cikluse različitih tipova zrakoplova. Jednako kao što postoje značajne razlike između primjerice osobnog automobila i tegljača, tako je važno je li zrakoplov jednomotorni sportski zrakoplov ili pak višemotorni poslovni zrakoplov, ograničimo li se samo na zrakoplove generalne avijacije s klipnim motorima. Pri tome je algoritam jednak uz proširenje za različite tipove zrakoplova

$$E_{pollutant} = AR_{fuel\ consumption\ aircrafttype} \times EF_{pollutant,aircrafttype} \quad (2)$$

pri čemu je, kao i kod Tier 1 metode,  $E_{pollutant}$  ukupna količina emisije štetne tvari,  $AR_{fuel\ consumption,aircrafttype}$  je podatak o aktivnosti (engl. *Activity Rate*) prema upotrebi goriva za svaku

fazu leta i različite tipove letova, a  $EF_{pollutant}$  je emisijski faktor određene tvari koji kod Tier 2 metode ovisi o tipu promatranog zrakoplova. Također, potrošeno gorivo potrebno je podijeliti između LTO i CCD faza. Potrošnja goriva i ukupne emisije štetnih tvari za jedan LTO ciklus procjenjuju se za svaki tip zrakoplova prema jednakom LTO ciklusu. Dakle, potrebno je prikupiti detaljne podatke o LTO aktivnosti te poznavati sastav flote, odnosno Tier 2 metodologija treba uključiti sve relevantne tj. najčešće korištene tipove zrakoplova. Pri tome se ne uvodi razlika među različitim motorima s kojima se isporučuje zrakoplov, već se kod izračuna pretpostavlja najčešće korišteni.

### 5.3. Tier 3 metoda

Najnaprednije metode procjene emisija su Tier 3 metode. Osnova Tier 3 metode su stvarni podaci svih letova. Metoda se prema dostupnim podacima dijeli na Tier 3A za koju je potrebno poznavati polazni i odredišni aerodrom (OD, engl. *Origin and Destination*). Najkompleksnija i najtočnija je metoda Tier 3B za koju je potrebno imati podatke o potpunoj trajektoriji svakog leta.

Za Tier 1 i Tier 2 metode primjenjuje se pristup odozgo prema dolje (engl. *top-down*) i osnova ulaznih podataka je potrošnja goriva. Tier 3 metode se s druge strane temelje na pristupu odozdo prema gore (engl. *bottom-up*) i temelje se na stvarnom i pojedinom letu. Korištenjem Tier 3A metoda za izračun emisija u CCD fazi u obzir se uzimaju udaljenosti između aerodroma, a „inventari se modeliraju korištenjem prosječne potrošnje goriva i podacima o emisijama u LTO fazi i raznim prijedanim udaljenostima u CCD fazi“ [31].

Pri korištenju Tier 3A metoda, u obzir se uzima količina emisija između pojedinih faza leta te potrošnja goriva u ovisnosti o duljini leta, jer udio emisija iz LTO faze opada s povećanjem udaljenosti između polazišnog i odredišnog aerodroma.

Najviša razina točnosti i preciznosti izračuna emisija štetnih tvari postiže se Tier 3B metodama kojima se računa potrošeno gorivo i emisije štetnih tvari za cijelu trajektoriju leta za koju se primjenjuju specifični podaci za zrakoplov i korišteni zrakoplovni motor. Tier 3B metodom mogu se grupirati i filtrirati izlazni podaci prema „zrakoplovu, motoru, aerodromu, snimljenim koordinatama, visini, vremenu... [31]“

Primjenom Tier 3A metode, emisije ugljikova dioksida dušikovih oksida, ugljikovodika, ugljikovog monoksida, čestica te korišteno gorivo računaju se na osnovi svakog promatranog leta koristeći emisijske faktore za tip zrakoplova odnosno korišteni motor.

Tier 1

$$E = \text{AVGAS L} \cdot EF \text{ [g/l]}$$

Tier 2

$$E = \left\{ \sum_{\text{tip zrakoplova}} \begin{matrix} \text{jet} & \cdot EF \\ \text{fighter} & \cdot EF \\ \text{transport} & \cdot EF \end{matrix} \right.$$

Tier 3

$$E = \sum \left( \begin{matrix} \text{jet} \\ \text{TAXI} \end{matrix} \cdot EF \right) + \left( \begin{matrix} \text{jet} \\ \text{TAKE OFF} \end{matrix} \cdot EF \right) + \left( \begin{matrix} \text{jet} \\ \text{CLIMB} \end{matrix} \cdot EF \right) + \left( \begin{matrix} \text{jet} \\ \text{CRUISE} \end{matrix} \cdot EF \right) + \left( \begin{matrix} \text{jet} \\ \text{APPROACH} \end{matrix} \cdot EF \right)$$

Slika 12. Grafička usporedba triju metoda procjene emisija

## 6. EMISIJSKI FAKTORI

### 6.1. Općenito o emisijskim faktorima

Kao što je ranije spomenuto, nemoguće je vremenski i finansijski efektivno mjeriti emisije iz apsolutno svih izvora. Kod zrakoplova generalne avijacije dodatni je problem što svaki uređaj koji se ugrađuje na zrakoplov mora posjedovati određene certifikate koje izdaju proizvođači zrakoplova i/ili nadležne zrakoplovne vlasti. Osim problema certificiranja, dodatni problem malih zrakoplova generalne avijacije je to što imaju znatno ograničenu najveću dozvoljenu poletnu masu, a uređaji koji bi se ugrađivali za mjerenje emisija u letu mogli bi znatno utjecati na ravnotežu masa zrakoplova. Mjerenje emisija iz zrakoplova prikazano je na slici 13. iz koje je jasno vidljiva složenost postupka mjerenja te količina potrebne opreme.



Slika 13. Primjer statičkog mjerenja emisija na tlu [28]

Usporedbe radi, kod osobnih automobila se za mjerenje emisija koristi prijenosni sustav za mjerenje emisija (engl. *Portable emission measurement system, PEMS*) te se razmatra korištenje tog ili sličnog uređaja na zrakoplovima, uz obvezno zadovoljenje svih sigurnosnih mjera i propisa kako se ni u kojem trenutku ispitivanja ne bi ugrozio zrakoplov te ljudi u zrakoplovu i izvan njega. Iz svega navedenog, jasno je dokazana nemogućnost direktnog mjerenja emisija štetnih tvari u letu te se stoga mjerenja provode u kontroliranim uvjetima s posebno opremljenim zrakoplovima. Mjerenjem potrošnje goriva i koncentracije pojedinih štetnih tvari u ispuhu zrakoplova, određuju se emisijski faktori (EF). Pri tome se ispituju razni režimi rada motora pa se tako reproduciraju najčešći oblici i faze leta. Primjerice, osnovna podjela režima rada je na dio leta u polijetanju, dio leta u penjanju, dio leta u prilazu i slijetanju te rad motora u voženju od početne pozicije do mjesta za polijetanje te na kraju leta od



napuštanja uzletno sletne staze do parkirališne pozicije. Tim fazama u općenitom primjeru odgovaraju vremena i postotak korištene snage navedeni ranije (Tablica 2 i Tablica 3). Emisijski faktori se u literaturi također nazivaju i emisijski indeksi (engl. *Emission index, EI*) [8], a primjer tipičnih vrijednosti naveden je u tablici 7.

Tablica 7. Prosječne vrijednosti emisijskih indeksa prema [8]

EI [g <sub>tvari</sub> /kg <sub>goriva</sub> ]	Najmanji	Nominalan	Najveći
NO <sub>2</sub>	10,4	13,8	17,3
SO <sub>2</sub>	0,8	1,2	1,6
BC	0,01	0,04	0,2
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,01	0,04	0,15
OC	0,01	0,02	0,6

Uz navedene, osnovni podatak koji se bilježi pri određivanju emisijskih faktora je maseni protok goriva u jedinici mase po jedinici vremena rada motora u određenom režimu. Sukladno SI sustavu trebalo bi koristiti mjernu jedinicu kilogram goriva po sekundi, ali najčešće se emisijski faktori određuju kao specifični, odnosno koristi se gram emitirana štetne tvari po kilogramu goriva. Iako se izražavaju kao specifični, oni se prvenstveno određuju mjerenjem, dakle nije dovoljno izmjeriti potrošnju odnosno protok goriva pa zatim emisijske faktore izvesti iz tih podataka, već je potrebno mjeriti vrijednosti emisija štetnih tvari te ih zatim samo matematički izraziti prema potrošnji goriva. To je važno napomenuti jer emisije štetnih tvari iz motora s unutarnjim izgaranjem znatno ovise o režimu rada motora prema kojem dijelovi motora, radni mediji i ispušni plinovi griju na različite temperature, u cilindrima se postižu različiti tlakovi, a i brzine strujanja usisa i ispuha također variraju. Sve navedene fizikalne veličine utječu na količinu emisija pojedinih štetnih tvari zbog složenosti kemijski reakcija pa se zbog toga emisijski faktori ne mogu jednoznačno odrediti iz potrošnje goriva. Mjerenje emisija i preračunavanje emisijskih faktora nije dio ovog rada, a kod izračuna emisija koriste se dostupni emisijski faktori izmjereni ranijim istraživanjima.

## 6.2. Dostupni emisijski faktori

Najopsežniji podaci o emisijskim faktorima zrakoplovnih klipnih motora navedeni su u Bazi podataka za zrakoplovne klipne motore (njem. *Flugzeug kolbenmotoren Datenbank*) (Prilog 1)

Saveznog ureda civilnog zrakoplovstva Švicarske (engl. *Federal Office of Civil Aviation, FOCA*; njem. *Bundesamt für Zivilluftfahrt, BAZL*). Ta organizacija je između 2000. i 2007. godine provela niz istraživanja i mjerenja, među kojima i mjerenje emisija u letu te su iz tih podataka sastavili trenutno najkompletniju listu emisijskih faktora. U bazi podataka se trenutno nalazi 16 vrsti zrakoplovnih klipnih motora. Za motore koji nisu eksplicitno navedeni u bazi podataka, iskazani su prosječni emisijski faktori, a rangirani su prema tipičnoj snazi motora, primjerice za motore do 147 kW (200 KS), za motore od 148 do 221 kW (201-300 KS), za motore od 222 do 368 kW (301-500 KS) te za motore iznad 368 kW (500 KS). Usporedbe radi, za mlazne motore javno je dostupna ICAO baza podataka zrakoplovnih motora s emisijskim faktorima za preko 500 mlaznih motora, a navedeni su emisijski indeksi za ugljikovodike, ugljikov monoksid, dušikove okside te maseni protok goriva [32].

Emisije štetnih tvari iz motora u bazi podataka mjere se sukladno procedurama propisanim u Dodatku 16 Konvenciji o međunarodnom civilnom zrakoplovstvu [26] te se certificiraju prema državi proizvodnje sukladno nacionalnom zakonodavstvu. Baza podataka sadrži motore čija se emisija prati ograničava pravnim aktima, a to su većinom turbomlazni i turboelisni motori sa statičnim potiskom većim od 26,7 kilonjutna. Podatke mjerenja emisija štetnih tvari pružaju proizvođači motora koji su ujedno i odgovorni za njihovu točnost [33]. Takve procedure nisu zakonski propisane za klipne motore, klipni zrakoplovni motori ne razvijaju se jednakom brzinom kao mlazni što dovodi do velike razlike u dostupnim podacima među kojima su i emisijski faktori. Osim emisija štetnih tvari, slično su propisane te se mjere i prate emisije buke takvih motora [34], što se ne provodi za motore s potiskom manjim od 26,7 kN kojima pripadaju i zrakoplovni klipni motori. Od 2018. godine propisane su i procedure za certificiranje zrakoplova prema emisijama ugljikova dioksida [35] koje bi trebale uključiti i klipne motore, no podaci o emisijama ostalih štetnih tvari ostati će na jednakoj razini do provedbe novih istraživanja. Iako je količina podataka o klipnim zrakoplovnim motorima vrlo mala u usporedbi s mlaznim zrakoplovnim motorima, važno je napomenuti da se klipni zrakoplovni motori ugrađuju u razne tipove zrakoplova i ne prilagođavaju se značajno zrakoplovima. Zbog toga, spomenutih 16 klipnih motora za koje postoje vjerodostojni podaci, pokrivaju više od 80 % tipova zrakoplovnih klipnih motora u Republici Hrvatskoj, dok se upotrebom prosječnih emisijskih faktora prema snazi postiže stopostotna pokrivenost flote u zadovoljavajućoj točnosti rezultata.

### 6.2.1. Emisijski faktori za krstarenje

Kao što se može vidjeti iz priloženih podataka, emisijski faktori navedeni su za četiri osnovna režima leta, voženje, polijetanje, penjanje i prilaz. Dakle, LTO ciklus je u potpunosti pokriven tim emisijskim faktorima, no nedostaju podaci za dio leta u krstarenju za koji se pretpostavlja da čini značajan udio provedenog vremena u letu. U Sažetom izvješću o mjerenjima emisija iz zrakoplovnih klipnih motora koje je provela FOCA [28] uočeni su emisijski faktori za krstarenje, a navedeni su kao primjer samo za jedan motor. Podaci u 8. preuzeti su iz navedenog izvješća, a prikazuje dvije znatno različite vrijednosti emisijskih faktora u krstarenju.

Tablica 8. Izvadak rezultata mjerenja s uključenim podacima za krstarenje [28]

MODE	POWER SETTING (%)	TIME (minutes)	FUEL FLOW (kg/s)	EI HC (g/kg)	EI CO (g/kg)	EI NO <sub>x</sub> (g/kg)	PM
TAKE-OFF	100	0,3	0,0182	12,7	818	6	
CLIMB OUT	85	2,5	0,018	12,3	787	6	
<b>CRUISE</b>	<b>65</b>	<b>60</b>	<b>0,0152</b>	<b>6,9</b>	<b>750</b>	<b>8</b>	
APPROACH	45	3	0,0098	11,5	1055	2	
TAXI	12	12	0,0038	42,6	1123	0	
<b>CRUISE LEAN</b>	<b>65</b>	<b>60</b>	<b>0,0138</b>	<b>5,4</b>	<b>473</b>	<b>23</b>	

Važno je uočiti da je korištena snaga jednaka u oba slučaja (65 %). Međutim, razlika u emisijskim faktorima, koja primjerice za NO<sub>x</sub> iznosi gotovo 300 %, uvjetovana je osiromašivanjem smjese goriva i zraka što se tipično izvodi tijekom leta zrakoplova s klipnim motorima kako bi se štedjelo gorivo. Emisijski faktori navedeni u modu *Cruise* izmjereni su s postavkom smjese goriva i zraka na najbogatijoj smjesi (engl. *full rich*). To znači da je smjesa goriva i zraka prebogata gorivom, odnosno količina zraka nije dovoljna za potpuno izgaranje goriva te dolazi do nepotpunog izgaranja goriva (što pokazuje i velik emisijski faktor ugljikova monoksida). Kod režima rada s osiromašenom smjesom, emisijski faktori, navedeni pod modom *Cruise Lean* bitno su drugačiji. Osiromašenje se izvodi prema uputi proizvođača zrakoplova. Pri tome se koriste razne tehnike osiromašivanja, a temelje se na promatranju temperature ispušnih plinova. Praktički je smjesa najsiromašnija kada je temperatura ispušnih

plinova najveća. Važno je napomenuti da tzv. osiromašena smjesa može biti i dalje bogata ( $\lambda < 1$ ) no u pravilu je siromašna ( $\lambda > 1$ ).

Prema navedenoj literaturi, zaključeno je da su emisijski faktori za krstarenje doista mjereni u tim istraživanjima, no iz nekog razloga su bili izostavljeni u bazi podataka. Zbog toga je kontaktiran g. Theo Rindlisbacher, kontakt osoba za navedena istraživanja u Švicarskoj, koji je naveo da ti podaci nisu dio baze podataka jer je baza podataka namijenjena za procjenu emisija isključivo iz LTO ciklusa prema vrsti motora i vremena u pojedinoj fazi LTO ciklusa, bez faze krstarenja. G. Rindlisbacher je ustupio podatkovne tablice (engl. *data sheet*) s rezultatima mjerenja (primjer u Prilogu 2). Iz tih rezultata su zatim očitani potrebni emisijski faktori za fazu krstarenja i tako su upotpunjeni podaci za potrebe ovog istraživanja.

### 6.2.2. Emisijski faktori ugljikova dioksida

Razine emisija ugljikova dioksida ne navode se u obliku emisijskih faktora jer u većoj mjeri ovise o potrošnji goriva nego li emisije navedenih štetnih tvari na koje znatno utječu uvjeti pri izgaranju. Emisijski faktori određuju se iz kemijskih jednadžbi izgaranja, a zbog jasno određenog sastava avionskog goriva i standardne kvalitete, emisijski faktori ne bi smjeli značajno varirati za pojedinu vrstu goriva [36]. Ugljikov dioksid nije sam po sebi štetan plin i ne utječe direktno na zdravlje, no smatra se da povećana koncentracija ugljikovog dioksida značajno pojačava efekt staklenika i globalno zatopljenje te tako indirektno negativno djeluje na zdravlje i okoliš. Kao što je navedeno ranije, kod izgaranja goriva, oko 1 % tvari u ispuhu čine produkti nepotpunog izgaranja kojima pripadaju i spomenute štetne tvari. Dakle, udio ugljikova dioksida je za mnogo veći od produkata nepotpunog izgaranja. Zbog toga se može smatrati da je izgaranje goriva u zrakoplovnom klipnom motoru potpuno, promatrajući isključivo količine ugljikova dioksida. Pri takvom potpunom izgaranju, količina ugljikovog dioksida ovisi isključivo o potrošenom gorivu i to linearno prema ravnoteži ugljika u kemijskoj reakciji izgaranja (oksidacije) goriva. Prema dostupnim podacima, sastavljena je tablica 9. u kojoj je emisija CO<sub>2</sub> izražena u mjernoj jedinici kilograma plina po kilogramu goriva, odnosno izračunat je emisijski faktor za ugljikov dioksid, usporediv s emisijskim faktorima drugih tvari. Preuzete vrijednosti prvo su preračunate iz kg/US gal u kg/l, nakon toga je iz literature utvrđena prosječna gustoća goriva te je na kraju emisijski faktor izražen u mjernoj jedinici kilograma ugljikova dioksida po kilogramu goriva.

Tablica 9. Emisijski faktori za ugljikov dioksid prema vrsti goriva

	Emisija CO <sub>2</sub> [37] [kgCO <sub>2</sub> / US gal goriva]	Emisija CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> / l <sub>goriva</sub> ] <sup>(1)</sup>	Gustoća goriva [kg / l]	Emisija CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> / kg <sub>goriva</sub> ]
Benzin	8,89	2,349	0,745 <sup>(2)</sup>	<b>3,152</b>
Aviobenzin	8,35	2,205	0,725 <sup>(3)</sup>	<b>3,041</b>
Kerozin	9,57	2,528	0,8075 <sup>(4)</sup>	<b>3,131</b>

<sup>(1)</sup> 1 US gal = 3,785411784 l

<sup>(2)</sup> aritmetička sredina raspona 0,71 ~ 0,78 kg / l, [38]

<sup>(3)</sup> [39]

<sup>(4)</sup> aritmetička sredina raspona 0,775 ~ 0,840 kg / l, [40]

### 6.2.3. Emisijski faktori za Tier 1 metode

Za Tier 1 metode ulazni podatak je samo korištena količina goriva, stoga su emisijski faktori izraženi prema korištenom gorivu bez detaljnije razrade o načinu uporabe goriva ili o tipu zrakoplova ili zrakoplovnog motora. Opći emisijski faktori za aviobenzin (engl. *Aviation Gasoline*), dostupni su u Bazi podataka emisijskih faktora (*Emission factor database, EFDB*) Međuvladinog panela o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) [41]. U navedenoj bazi podataka nalaze se emisijski faktori za metan (CH<sub>4</sub>), diduškov oksid (N<sub>2</sub>O), dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) te ugljikova dioksida (CO<sub>2</sub>). Emisijski faktori navedeni su u mjernim jedinicama mase po energiji izgaranog goriva. Donja ogrjevna vrijednost (DOV) aviobenzina iznosi oko 43,5 MJ/kg [42] pa su pomoću te vrijednosti emisijski faktori izraženi u gramima tvari po kilogramu goriva radi lakše usporedbe s drugim, u ovom radu navedenim, emisijskim faktorima.

Tablica 10. Emisijski faktori aviobenzina prema IPCC [41], [42]

AVGAS 100 LL DOV	CH <sub>4</sub> EF	N <sub>2</sub> O EF	NO <sub>x</sub> EF	CO <sub>2</sub> EF
43,5 MJ <sub>goriva</sub> /kg <sub>goriva</sub>				72 gCO <sub>2</sub> / MJ <sub>goriva</sub>
4,35×10 <sup>-5</sup> TJ <sub>goriva</sub> / kg <sub>goriva</sub>	0,5 kgCH <sub>4</sub> / TJ <sub>goriva</sub>	2 kgN <sub>2</sub> O / TJ <sub>goriva</sub>	250 kgNO <sub>x</sub> / TJ <sub>goriva</sub>	
<b>gtvari / kg<sub>goriva</sub></b>	<b>0,0218</b>	<b>0,087</b>	<b>10,875</b>	<b>3132,0</b>

Za potrebe izrade Nacionalnog inventara emisija Republike Hrvatske, koriste se slične vrijednosti emisijskih faktora, također izražene prema ogrjevnoj vrijednosti goriva [43]. Za potrebe usporedbe emisijskih faktora, emisijski faktori za ugljikov monoksid i nemetanske hlapive organske spojeve navedeni su u nešto starijoj no još uvijek aktualnoj literaturi [44]. Za ugljikov monoksid navedena je vrijednost emisijskog faktora od 10 000 – 20 000 kg/TJ koji vrijedi isključivo za aviobenzin. Za mlazne motore iznos je 100 do 200 puta manji. Za nemetanske hlapive organske spojeve navedena je vrijednost od 300 kg/TJ uz napomenu da vrijedi isključivo za aviobenzin, dok je za kerozin nekoliko puta manja. Uz navedenu donju ogrjevnju vrijednost goriva od 43,5 MJ/kg, preračunata vrijednost emisijskog faktora za ugljikov monoksid iznosi 435-870 g/kg goriva (srednja vrijednost koja se uzima je 652 g/kg goriva), a za nemetanske hlapive spojeve iznosi 13,05 g/kg goriva.

*Tablica 11. Emisijski faktori aviobenzina prema Izvješću nacionalnog inventara emisija Republike Hrvatske [43]*

Aviation gasoline NCV <sup>(1)</sup>	CH <sub>4</sub> EF	N <sub>2</sub> O EF	NO <sub>x</sub> EF	CO <sub>2</sub> EF
44,59 MJ <sub>goriva</sub> /kg <sub>goriva</sub>	-	-	-	70 gCO <sub>2</sub> / MJ <sub>goriva</sub>
$4,459 \times 10^{-5}$ TJ <sub>goriva</sub> / kg <sub>goriva</sub>	0,5 kgCH <sub>4</sub> / TJ <sub>goriva</sub>	2 kgN <sub>2</sub> O/ TJ <sub>goriva</sub>	-	
<b>gtvari / kg<sub>goriva</sub></b>	<b>0,0223</b>	<b>0,089</b>	-	<b>3121,3</b>

<sup>(1)</sup> Donja ogrjevna vrijednost, engl. *Lower Net Calorific Value*

Iz tablica se može zaključiti da su emisijski faktori gotovo jednaki te da ovise o ogrjevnoj vrijednosti goriva koja se može razlikovati zbog brojnih parametara. Budući da se u IPCC podacima navodi i podatak o emisijskom faktoru dušikovih oksida, u daljnjim razmatranjima Tier 1 metoda usvojiti će se vrijednosti iz tablice 10.

### 6.3. Usporedba dostupnih emisijskih faktora

Ranije su navedeni emisijski faktori iz nekoliko različitih izvora predviđeni za upotrebu u različitim razinama metodama. U ovom poglavlju grafički će se usporediti vrijednosti emisijskih faktora za pojedine tvari prema izmjeranim podacima koji su dobiveni istraživanjima

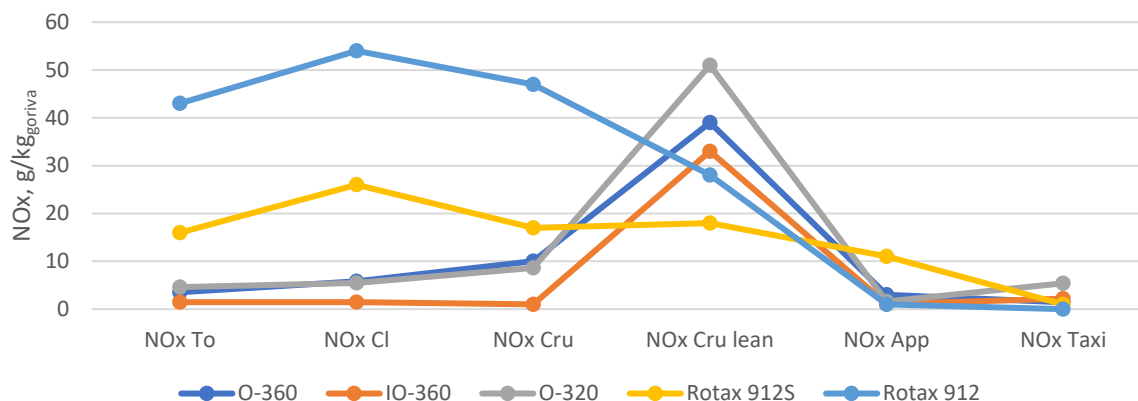
(FOCA) te podacima koji su navedeni kao preporuka Međuvladinog panela o klimatskim promjenama.

Za reprezentativne tipove motora odabrani su O-360, IO-360, O-320, Rotax 912 i Rotax 912S. Navedeni motori čine više od 50 % svih registriranih motora u Republici Hrvatskoj [45]. Uzevši u obzir procjene naleta koji ostvaruju zrakoplovi opremljeni tim motorima, može se zaključiti da odabrani motori čine značajniji udio u operacijama zrakoplova u RH i da kao takvi doista predstavljaju valjani uzorak za procjenu emisija.

Slika 14. prikazuje ovisnost emisijskih faktora za dušikov dioksid za pojedine motore u ovisnosti o fazi leta, odnosno režimu rada motora. Oznaka *To* (od engl. *Take Off*) u sljedećim grafovima predstavlja fazu polijetanja, odnosno režim rada motora pri punoj snazi. Oznaka *Cl* (od engl. *Climb*) predstavlja fazu penjanja, a mjerenja su provedena sa 85 % snage.

Oznakom *Cru* (od engl. *Cruise*) navedeni su emisijski faktori u fazi krstarenja, a mjereni su pri 65 % snage motora. Za Rotax motore ne postoji mogućnost ručnog postavljanja bogatstva smjese pa su vrijednosti *Cru* izmjerene pri 75 % snage motora. *Cru lean* su također emisijski faktori pri krstarenju, no pri korištenju osiromašene smjese goriva i zraka. Za Rotax motore su izmjereni pri snazi od 65 %, a bogatstvo smjese je automatski regulirano sustavima motora. Proizvođač ostalih motora na kojima su izvedena mjerenja je tvrtka Lycoming.

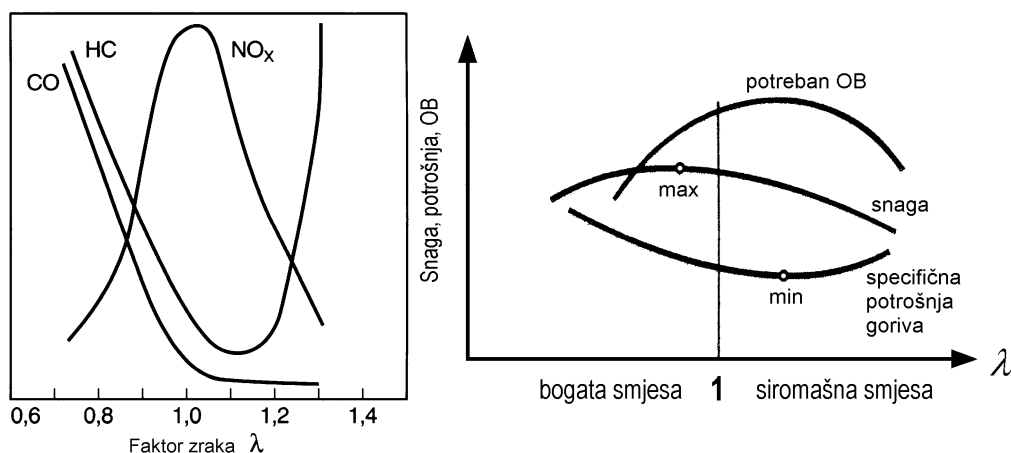
Faza prilaza označena je s *App* (od engl. *Approach*), a emisijski faktori su izmjereni pri 45 % snage. Emisijski faktori u voženju zrakoplova prije polijetanja i nakon slijetanja utvrđeni su prema snazi preporučenoj od strane proizvođača motora kroz tzv. Operatorske priručnike. Uvidom u rezultate ispitivanja utvrđeno je da se radi o snazi od 12 do 14 %.



Slika 14. Primjer emisijskih faktora za  $NO_x$ , prema [28]

Emisijski faktori Lycoming motora sličnih su vrijednosti za sve faze osim za krstarenje s osiromašenom smjesom. Primjerice, emisijski faktor za krstarenje osiromašenom smjesom za motor IO-360, više je od 30 puta veći nego li kod krstarenja s bogatom smjesom. Ostali Lycoming motori također pokazuju znatno povišene vrijednosti u krstarenju osiromašenom smjesom. To se događa zato jer se osiromašivanjem smjese bitno povećava temperatura izgaranja, a samim time i temperature ispušnih plinova. Upravo se pomoću praćenja temperature ispušnih plinova može namjestiti siromašna smjesa goriva i zraka. Povišenje temperature bitno povećava reakciju dušika sa zrakom.  $NO_x$  se počinje stvarati (u većoj mjeri) iznad  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$  i najveće razine emisija dušikovih oksida postižu se iznad  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a rastu i s porastom tlaka u cilindru. Dodatno, stvaranje dušikovih oksida pospješuje i osiromašena smjesa, jer zbog duljeg trajanja izgaranja, produljuje se i vrijeme u kojem toplina prelazi na stijenke cilindra motora s unutarnjim izgaranjem što uzrokuje rast temperature izgaranja u cilindru tako da su ovi rezultati u potpunosti u skladu s drugim istraživanjima [46].

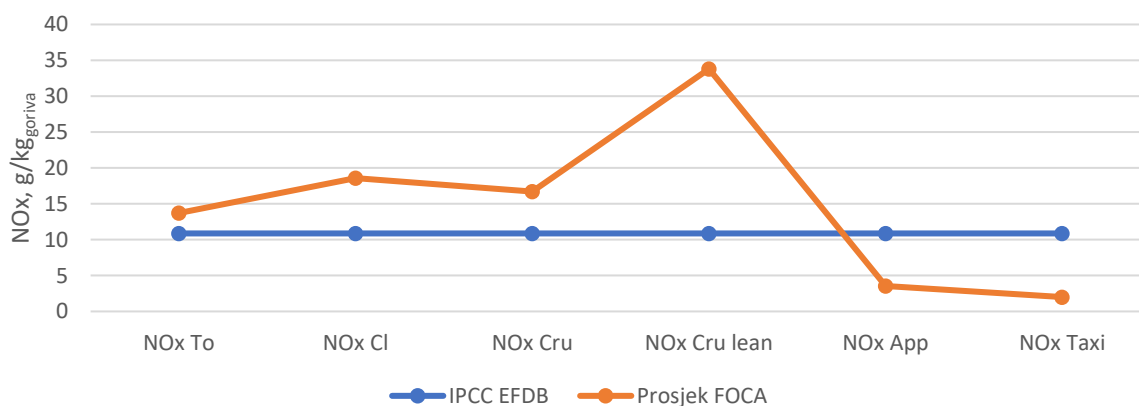




Slika 15. Utjecaj faktora zraka  $\lambda$  na emisiju štetnih ispušnih plinova, snagu i specifičnu potrošnju goriva te na potreban oktanski broj [47]

S druge strane, Rotax motori s automatskim upravljanjem bogatstvom smjese najveće razine emisije dušikovih oksida postižu pri režimu rada u penjanju. Budući da nije u potpunosti poznat način rada tog automatskog upravljanja, ne može se sa sigurnošću reći zbog čega su takve vrijednosti emisijskih faktora, no može se pretpostaviti da se radi o kombinaciji efekta zbog kombinacije efekta zbog osiromašivanja smjese i povećanja opterećenja motora s ciljem smanjenja potrošnje.

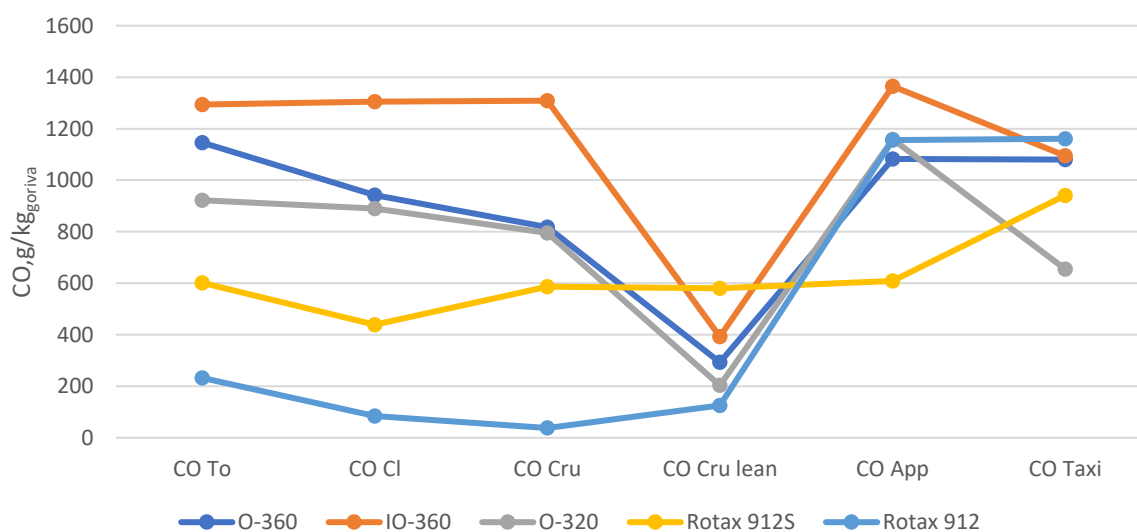
Slika 16. prikazuje usporedbu emisijskih faktora iz ranijeg dijagrama prikazanih kao srednja vrijednost svih motora s emisijskim faktorima Međuvladinog panela o klimatskim promjenama koji se koriste kod Tier 1 metoda i ovise isključivo o gorivu. Budući da se kod takvih analiza ne razlikuju faze leta, vrijednost emisijskih faktora jednaka je za sve faze i režime rada motora.



Slika 16. Usporedba emisijskih faktora za NO<sub>x</sub>, u pojedinom režimu rada

Iz slike se primjećuju relativno slične vrijednosti emisijskih faktora za sve faze osim krstarenja osiromašenom smjesom. Za tu fazu, odnosno režim rada motora, stvarni emisijski faktori su 3 puta veći od prosječnog emisijskog faktora za Tier 1 metodu, što predstavlja potencijalni problem kod izračuna, tj. moguće je da se zbog toga emisije procjenjuju manjim od stvarnih.

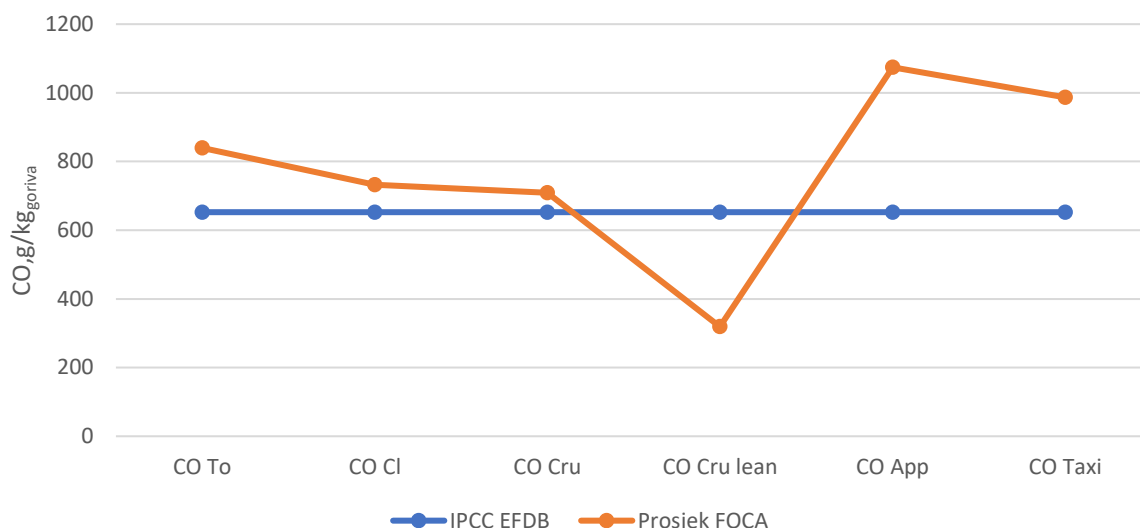
Slično kao i s dušikovim oksidima, analiza emisijskih faktora provedena je za iste motore i za ugljikov monoksid (slika 17).



Slika 17. Primjer emisijskih faktora za CO

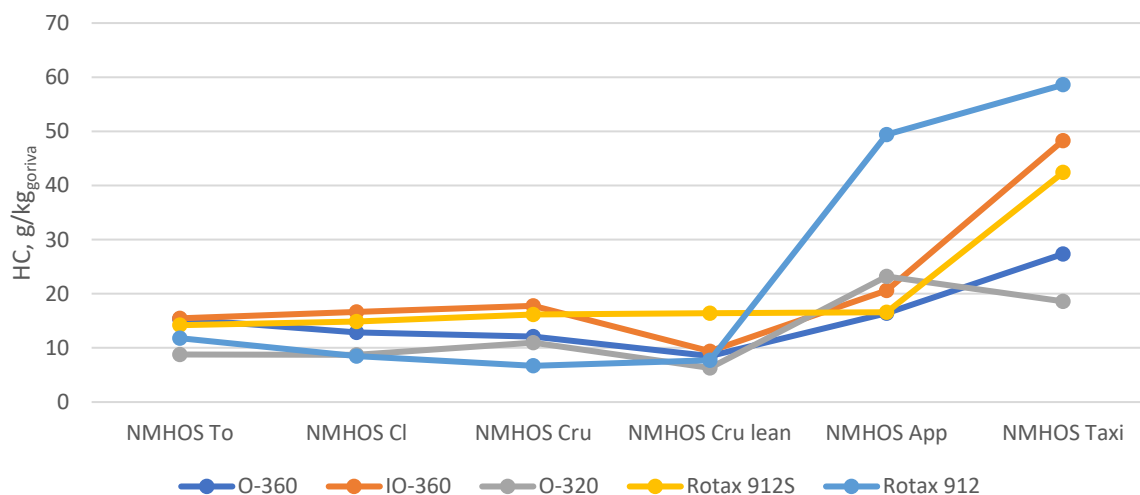
U pravilu, dok osiromašivanjem smjese raste emisija dušikovih oksida, zbog veće količine kisika za izgaranje dolazi do potpunijeg izgaranja pa se smanjuje emisija ugljikova monoksida, što jasno pokazuje ovaj dijagram. Rotaxovi motori također pokazuju najniže vrijednosti u režimima rada u kojima je emisija dušikovih oksida bila najviša, tako da se sada potvrđuje teza o upravljanju bogatstvom smjese tako da se pri penjanju i krstarenju koristi osiromašena smjesa.

Slika 18 ponovo prikazuje prosjek svih ranije spomenutih motora i IPCC podataka. Važno je napomenuti da su ovdje prikazane vrijednosti IPCC emisijskih faktora za ugljikov monoksid izražene isključivo za aviobenzin, dakle za zrakoplovne klipne motore. Za mlazne motore oni su znatno manji prema istome izvoru.



Slika 18. Usporedba emisijskih faktora za CO, u pojedinom režimu rada

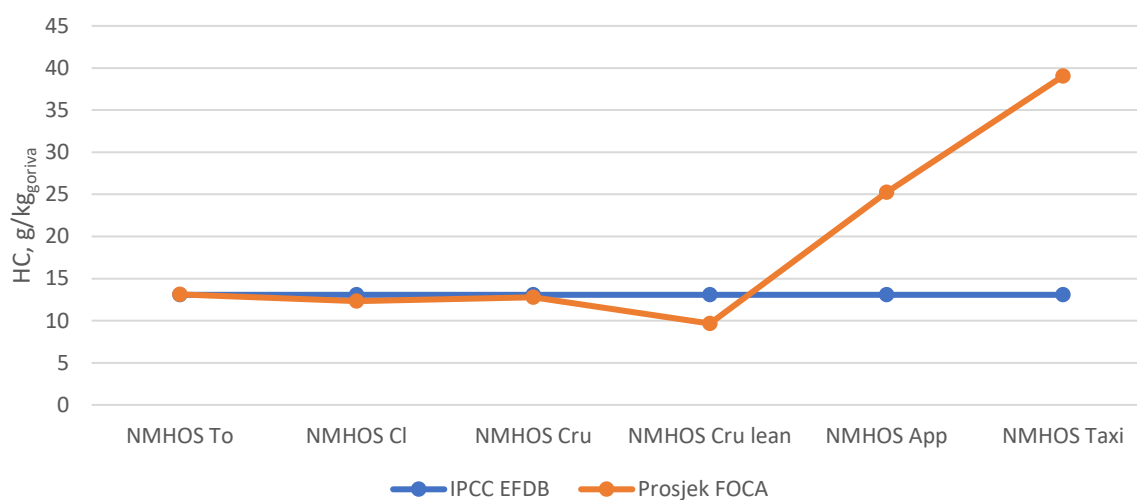
Usporedbom je jasno pokazano da su ti emisijski faktori mnogo manji od stvarnih kod prilaza, ali i mnogo veći kod krstarenja osiromašenom smjesom goriva i zraka. Ovakve razlike mogu u vrijednostima mogu prouzročiti značajne razlike u rezultatima, no to ovisi o vremenu provedenom u pojedinoj fazi, odnosno režimu rada. Utjecaj ovih parametara detaljno će se analizirati u izračunu emisija na primjeru.



Slika 19. Primjer emisijskih faktora za HC

Kod navođenja emisijskih faktora za ukupne ugljikovodike (engl. *Total Hydrocarbons*, *THC*) vožno je napomenuti da se to odnosi sve ugljikovodike koje je moguće detektirati i mjeriti. Emisijma ugljikovodika pripadaju i emisije hlapivih organskih spojeva (HOS) (engl. *Volatile*

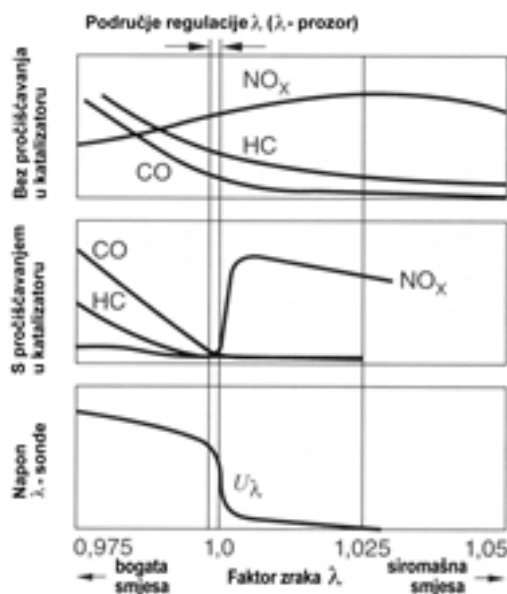
*Organic Compound, VOC*) među kojima je važno razlikovati nemetanske hlapive organske spojeve (NMHOS) kao što su benzen, etanol, formaldehid i sl. te metan, koji nije direktno toksičan, no bitno doprinosi efektu staklenika. Budući da su u IPCC podacima navedene emisije nemetanskih organskih spojeva i metana odvojeno, za potrebe usporedbe one su zbrojene, jer su mjerenjima utvrđeni emisijski faktori za ukupne ugljikovodike koji uključuju obje spomenute vrste. Slika 20. prikazuje dobro podudaranje emisijskih faktora iz IPCC baze podataka i izmjerenih vrijednosti FOCA-e za ugljikovodike pri polijetanju, penjanju i krstarenju bogatom smjesom.



Slika 20. Usporedba emisijskih faktora za HC, u pojedinom režimu rada

Manje odstupanje pri krstarenju osiromašenom smjesom je očekivano, a utjecaj značajnijih razlika pri prilazu i voženju potrebno je provjeriti na odabranom uzorku.

Na kraju valja spomenuti kako se kod automobila smanjenje emisija ovdje spomenutih tvari jednostavno smanjuje ugradnjom katalizatora. Slika 21. prikazuje smanjenje emisija štetnih tvari.



Slika 21. Utjecaj faktora zraka  $\lambda$  na emisije štetnih ispušnih plinova bez i s katalizatorom [47]

Donji dio slike pokazuje napon  $\lambda$ -sonde, koja mjeri faktor zraka. Dakle, za katalizator je vrlo bitan faktor zraka jer djeluje u vrlo uskom području oko faktora zraka 1. Smanjenjem faktora zraka, emisije ugljikovodika i ugljikovog monoksida povećavaju se usprkos katalizatoru, dok isto tako povećanjem faktora zraka, emisije dušikovih oksida također brzo rastu. Dakle, nije dovoljno samo ugraditi katalizator, već je nužno osigurati konstantan faktor zraka što nije jednostavno kod zastarjelih klipnih zrakoplovnih motora.

## **7. UNAPRIJEĐENI MODEL PROCJENE EMISIJA ŠTETNIH TVARI NA TEMELJU UNOSA JEDNOSTAVNIH PODATAKA**

Kod razmatranja mogućnosti uvođenja novih modela u procjene i izračune emisija štetnih tvari, značajan problem predstavljaju podaci o aktivnostima izvora. Prikupljanje novih podataka može biti dugotrajan i složen proces, no osim toga, prilikom izrade inventara emisije potrebno je jednake načine izračuna primijeniti na već postojeće rezultate zbog usporedivosti rezultata. Zbog toga je važno utvrditi koji se podaci koriste kod izračuna i jesu li dostupni za prethodna promatrana razdoblja. U ovom modelu nit vodilja je izračunati emisije štetnih tvari bez velike promjene u prikupljanju podataka. Trenutno se koriste Tier 1 metode upravo iz razloga jer je jednostavno pribaviti podatke o prodanom gorivu te se oni praktički sastoje od jednog podatka (broja) godišnje. Za ovaj unaprijeđeni model izračuna emisija, ulazni podaci bi bili oni koji se već vode kao zakonska obveza, samo bi bilo potrebno zabilježiti ih, primjerice prilikom godišnjih pregleda zrakoplova. Primjereni podaci za ovu obradu mogu se pribaviti iz dnevnika letenja zrakoplova ili letačke knjižice pilota, dokumenata u kojima se upisuju podaci o svakom izvedenom letu.

Ulazni podaci za unaprijeđeni model procjene emisija su zapisi o letu. Iz zapisa o letu potrebni su podaci o datumu leta, vremenu početka leta, vremenu završetka leta, aerodromu polijetanja, aerodromu slijetanja te broj LTO ostvarenih ciklusa u promatranom letu.

Ulazni podaci se redom koriste u različitim dijelovima postupka obrade podataka koja se izvodi ovim modelom. Datum leta ne utječe na konačni rezultat o emisijama štetnih tvari, no prema datumu se mogu razvrstati letovi i promatrati isključivo željeni period. Iz vremena početka i završetka leta računa se ukupno vrijeme trajanja leta. Jedan dio ukupnog vremena trajanja leta čini glavna LTO faza (početno voženje, polijetanje, prilaz i slijetanje te voženje na kraju leta). Osim glavne LTO faze, brojni zrakoplovi generalne avijacije tijekom leta izvode dodatna polijetanja s produžavanjem koja predstavljaju djelomične LTO faze (polijetanje, penjanje, prilaz i slijetanje, ali bez voženja).

Na taj način je utvrđen udio leta u LTO dijelu leta, dok se preostalo vrijeme odnosi na CCD fazu leta u kojem se prvenstveno leti na ruti. Budući da je teško egzaktno utvrditi režim rada motora odnosno način leta za cjelokupni let, u ovom modelu pretpostaviti će se da se osiromašivanje smjese u letu izvodi za vrijeme leta na ruti pri konstantnoj visini, brzini i pravcu leta. Zbog toga će se za svaki let izračunati udaljenost između polaznog i odredišnog aerodroma i pretpostaviti će se da se taj dio leta obavlja osiromašenom smjesom. Uobičajenom brzinom

krstarenja zrakoplova za pojedini tip zrakoplova izračunati će se vrijeme potrebno za prelet utvrđene udaljenosti između aerodroma. Za preostali dio vremena pretpostavlja se da se zrakoplov nalazi u režimima penjanja ili spuštanja na ruti, leta u zoni namijenjenoj usavršavanju raznih manevara ili drugim sličnim prijelaznim režimima leta odnosno rada motora pri čemu se pretpostavlja let snagom za krstarenje, ali pri najbogatijoj smjesi goriva i zraka.

Nakon podjele vremena, koje je osnovna mjera za izračun emisija zbog faktora protoka goriva izraženog kao masa goriva u jedinici vremena, potrebno je utvrditi koje emisijske faktore je potrebno koristiti za koliki udio vremena. Kod LTO ciklusa, za koji je utvrđeno vrijeme u modu (engl. *time in mode*) za voženje, polijetanje, početno penjanje i prilaz, koriste se emisijski faktori za svaki od tih modova za razmjerni dio vremena. Za utvrđeni udio vremena u krstarenju osiromašenom smjesom koriste se emisijski faktori za krstarenje osiromašenom smjesom. Za posljednji dio vremena primjenjuju se emisijski faktori za krstarenje bogatom smjesom.

Na kraju provedenog postupka, rezultati se prezentiraju numerički, ali i grafički pomoću tzv. *dashboarda*. Na takvom prikazu jasno su izražene emisije pojedinih tvari te ukupno potrošeno gorivo. Dobivene rezultate moguće je filtrirati prema tipu zrakoplova, prema registraciji zrakoplova te pri tome promatrati određeni vremenski period.

## 7.1. Dnevnik letenja

Kao ulazni podaci koriste se informacije koje se bilježe kao dio uobičajenog postupka planiranja i bilježenja letova. Piloti komercijalnih zrakoplova te zrakoplovne kompanije imaju obvezu detaljnog dokumentiranja letova. Za svaki se let bilježi posada, broj putnika, količina tereta, potrošeno gorivo, ruta leta, vrijeme leta, itd. Za zrakoplove generalne avijacije i njihove pilote, obveze bilježenja i vođenja dokumentacije znatno su pojednostavljene. Svaki pilot upisuje osnovne podatke o letu u letačku knjižicu aviona. Vlasnici zrakoplova, aeroklubovi, organizacije koje izvide programe školovanja pilota i slične fizičke i pravne osobe obvezne su voditi neki oblik Dnevnika letenja, koji je u današnje vrijeme najčešće u nekom digitalnom obliku. Primjer podataka koji se bilježe u letačkoj knjižici prikazuje tablica 12., a primjer podataka koji se bilježe u tipičnom dnevniku letenja prikazuje tablica 13, a tablice su izrađene prema slikama 22. i 23.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Datum Date 2016.	Imena članova posade Names of Crew Members	Priroda leta Nature of flight	Br. pu- nika Nr. Pax.	Polijetanje Departure	Slijetanje Arrival	Vrijeme leta Flight time	Ukupan nalet Total Time	Ukupan ciklus Total Cycles
				Mjesto Place	Mjesto Place	Sati Hours	Min. Min.	Donos: Forward:
19.05.2016.	ERIHA MIROSLAVIĆEVIĆ	VFR	1	LDOL 16 <sup>00</sup>	LDOL 16 <sup>22</sup>	00 22	4333	3 12876
19.05.2016.	DEJKO DIMIJEVIĆ	VFR	1	LDOL 17 <sup>00</sup>	LDOL 17 <sup>26</sup>	00 26	4333	6 12878
21.05.2016.	JOSIP JURIZA	VFR	1	LDOL 19 <sup>00</sup>	LDOL 20 <sup>05</sup>	01 05	4334	5 12893
31.05.2016.	ERIHA MIKŠIČIĆ	VFR	1	LDOL 00 <sup>00</sup>	LDOL 00 <sup>15</sup>	00 15	4334	7 12894
02.06.2016.	DEJKO DIMITJEVIĆ	VFR	1	LDOL 14 <sup>20</sup>	LDOL 14 <sup>40</sup>	00 20	4334	3 12895
04.06.2016.	ERIHA MIROSLAVIĆEVIĆ	VFR	1	LDOL 11 <sup>00</sup>	LDOL 11 <sup>16</sup>	00 16	4335	1 12896
05.06.2016.	JOSIP JURIZA	VFR	1	LDOL 12 <sup>10</sup>	LDOL 13 <sup>10</sup>	01 00	4335	9 12891
08.06.2016.	DEJKO DIMITJEVIĆ	VFR	1	LDOL 08 <sup>00</sup>	LDOL 09 <sup>15</sup>	01 15	4336	3 12892
18.06.2016.	ERIHA MIROSLAVIĆEVIĆ	VFR	1	LDOL 18 <sup>00</sup>	LDOL 18 <sup>30</sup>	00 30	4337	3 12894
19.06.2016.	JOSIP JURIZA	VFR	1	LDOL 18 <sup>15</sup>	LDOL 18 <sup>00</sup>	00 15	4337	5 12895

71

Zbroj naleta i ciklusa prenijeti na sljedeću stranu.  
Sum of flight time and cycles forward to next page.

Slika 22. Primjer ručno ispunjene Knjižice zrakoplova

1	2	3	4	5	6	7	8
Datum Date 2012.	Polijetanje Departure	Slijetanje Arrival	Zrakoplov Aircraft	Vrijeme leta u jednolanoj posadi Single pilot time	Vrijeme leta u višecelanoj posadi Multi-pilot time	Ukupno vrijeme naleta Total time of flight	Ime zapovjednika zrakoplova Name PIC
	Mjesto Place	Mjesto Place	Tip, model, varijanta Make, model, variant	Registacija Registration	JM SE	VM ME	
01.02.12	LDVA 11 <sup>30</sup>	LDZA 12 <sup>25</sup>	C-172	9A-DVW	✓		00 55 BUCKOVIC' 2 1
01.02.12	LDZA 13 <sup>00</sup>	LDVA 14 <sup>30</sup>	"	"	✓		01 30 " 1
16.02.12	LDVA 13 <sup>25</sup>	LDVA 14 <sup>45</sup>	"	"	✓		01 20 " 1
22.02.12	LDVA 13 <sup>35</sup>	LDZA 14 <sup>20</sup>	"	"	✓		00 45 " 1
22.02.12	LDZA 16 <sup>10</sup>	LDVA 16 <sup>55</sup>	"	"	✓		00 45 " 1
26.02.12	LDVA 11 <sup>25</sup>	LDVA 12 <sup>35</sup>	"	"	✓		01 10 " 1
26.02.12	LDVA 14 <sup>00</sup>	LDVA 15 <sup>10</sup>	"	"	✓		01 10 " 1
02.03.12	LDVA 09 <sup>40</sup>	LDPL 13 <sup>00</sup>	"	"	✓		03 20 BUCKOVIC' 2 3
02.03.12	LDPL 14 <sup>20</sup>	LDPL 16 <sup>05</sup>	"	"	✓		01 45 DELIC' F. 2
03.03.12	LDPL 11 <sup>15</sup>	LDPL 13 <sup>50</sup>	"	"	✓		02 35 BUCKOVIC' 2 3
03.03.12	LDPL 14 <sup>15</sup>	LDPL 16 <sup>45</sup>	"	"	✓		02 30 DELIC' F. 3
04.03.12	LDPL 12 <sup>45</sup>	LDPL 13 <sup>20</sup>	"	"	✓		00 40 BUCKOVIC' 2 1
04.03.12	LDPL 13 <sup>30</sup>	LDVA 16 <sup>20</sup>	"	"	✓		02 50 " 3
06.03.12	LDVA 10 <sup>15</sup>	LDVA 10 <sup>45</sup>	"	"	✓		00 30 " 1
10.03.12	LDVA 09 <sup>00</sup>	LDVA 10 <sup>05</sup>	"	"	✓		01 05 BUCKOVIC' 2 6
10.03.12	LDVA 11 <sup>40</sup>	LDVA 12 <sup>50</sup>	"	"	✓		01 40 JAKOVIC' 6
10.08.12	LDZL 15 <sup>30</sup>	LDZL 16 <sup>30</sup>	"	9A-DZA	✓		01 15 DELIC' F. 5
16.08.12	LDZL 17 <sup>00</sup>	LDZA 18 <sup>20</sup>	"	9A-DZA	✓		01 35 DELIC' F. 1
Ukupno na ovoj stranici Total this page						27 20	41
Ukupno prenos s prethodne stranice Total from previous pages						26 55	106
Ukupno vrijeme leta Total time						54 15	147

16

Slika 23. Primjer ručno ispunjene Knjižice pilota



Tablica 12. Primjer vođenja Knjižice aviona (obveza organizacije/vlasnika zrakoplova)

Datum 2018.	Imena članova posade	Priroda leta	Broj putnika	Polijetanje		Slijetanje		Vrijeme leta		Ukupan nalet		Ukupan ciklus		Napomena i/ili detalji o provjerama
				Mjesto	Vrijeme	Mjesto	Vrijeme	Sati	Min.	Donos:		Donos:		
15.9.	VS	VFR	2	LDVA	1200	LDZL	1300	1	00	1234	1	2501	3	/

Tablica 13. Primjer vođenja Dnevnika letenja (obveza pilota)

Datum	Tip aviona	Registracija	Posada	Aerodrom polijetanja	Aerodrom slijetanja	Vrijeme polijetanja	Vrijeme slijetanja	Trajanje VFR	Trajanje Noćno	Trajanje IFR	Ukupno	Broj leta	Napomena
25.1.	C172	S5-DAC	VS	LDZA	LDLO	1445	1745	1:00	0:00	2:00	3:00	1	/

Usporedbom tih dviju tablica, zaključuje se da se iz obje tablice mogu očitati isti ili slični podaci:

- registracija zrakoplova,
- datum leta,
- mjesto i vrijeme polijetanja,
- mjesto i vrijeme slijetanja,
- trajanje leta,
- broj ostvarenih ciklusa.

Ti se podaci mogu iskoristiti kao podaci o aktivnosti zrakoplova (engl. *Activity Data*) kao temelj za izračun ili procjenu emisija štetnih tvari po pojedinom letu. Ponavljanjem postupka moguće je izračunati rezultat po pojedinom avionu u zadanom vremenskom razdoblju, a uključivanjem većeg broja zrakoplova, moguće je izračunati ili procijeniti emisije štetnih tvari cijele flote organizacije ili čak države i tako formirati inventar emisija za promatranu flotu.

## 7.2. Dodatni podaci

U postupku izračuna potrebno je odrediti dodatne podatke koji će ulazne podatke proširiti dodatnim općepoznatim i javno dostupnim informacijama i pritom omogućiti izračun pomoću ovog modela. Dodatni podaci sastoje se o tipičnom trajanju LTO ciklusa prilagođeno zrakoplovima generalne avijacije. Nadalje, sama srž Tier 3A metodologije čine podaci o polaznom i odredišnom aerodromu, a najviše se iz tih podataka može dobiti informacija ako se utvrdi automatiziran način njihove obrade i upotrebe. U ovom unaprijeđenom modelu za svaki let se utvrđuje minimalna udaljenost koju zrakoplov mora preletiti između tih dvaju aerodroma.

### 7.2.1. Udaljenosti između aerodroma

Dio leta nakon početnog (inicijalnog) penjanja i prije slijetanja uključuje faze penjanja, krstarenja i spuštanja (engl. *Climb / Cruise / Descent, CCD*). Dakle jedan uobičajen let počinje prvim dijelom LTO ciklusa, zatim zrakoplov prelazi u CCD fazu te na kraju let završava drugim dijelom LTO ciklusa. Kod modeliranja emisija štetnih tvari iz zrakoplova, važno je u proračun uključiti obje vrste, odnosno dijela ili faze leta. Za primjenu Tier 3 metode, potrebni su podaci o tipu zrakoplova i polazni i odredišni zrakoplov iz čega se može izraziti duljina leta za svaki promatrani let. Za razliku od ostalih, jednostavnijih metoda, ova metoda uključuje stvarnu

aktivnost izvora onečišćenja. Za usporedbu, Tier 1 metode temelje se isključivo na podacima o prodaji goriva te ne uključuje podatke o aktivnostima. U ovom unaprijeđenom modelu, duljina leta određivati će se automatizmom iz podataka o letovima, na način da će se koristiti unaprijed definirana udaljenost između pojedinih aerodroma. U tu svrhu koristit će se matrica dimenzija  $[(n + 1) \times (n + 1)]$  pri čemu je  $n$  broj aerodroma na promatranom području. Primjer takve matrice prikazan je tablično (Tablica 14.) za 3 najprometnija međunarodna aerodroma u Republici Hrvatskoj.

Tablica 14. Primjer matričnog zapisa udaljenosti aerodroma u kilometrima

	Zagreb	Split	Dubrovnik
Zagreb	0	245	394
Split	245	0	193
Dubrovnik	394	193	0

Budući da prema trenutno važećem VFR priručniku Hrvatske kontrole zračne plovidbe [48] u Hrvatskoj trenutno postoji 36 aerodroma, izračun udaljenosti proveden je pomoću programa Excel. Iako je broj međunarodnih i široko poznatih aerodroma znatno manji, u zadnjih nekoliko godina znatno se povećao broj aerodroma zahvaljujući proširenju mreže aerodroma na vodi. Osim toga, za generalnu avijaciju su najzanimljiviji i pretpostavlja se najkorišteniji sportski aerodromi. Tablica 15. prikazuje broj pojedine vrste aerodroma. Aerodromi na vodi kao specifična vrsta aerodroma navedeni su odvojeno, iako su i oni namijenjeni isključivo za VFR promet.

Tablica 15. Broj aerodroma u RH prema vrsti prometa

Vrsta aerodroma	Broj
Aerodromi s dozvolom za IFR promet	8
Aerodromi s isključivo VFR prometom	17
Aerodromi na vodi	11
Ukupno	36

Za potrebe određivanja matrice udaljenosti, za svaki aerodrom su iz službenog VFR priručnika preuzete GPS koordinate aerodroma iz zemljopisnih i administrativnih podataka za svaki aerodrom. Prilog 3 je primjer prve strane tog dokumenta, dostupnog na internetskim stranicama Hrvatske kontrole zračne plovidbe. Analizom podataka otkriveno je da navedene koordinate predstavljaju zapis u stupnjevima, minutama i sekundama geografske širine odnosno dužine, pa su ti podaci preračunati u stupnjeve geografske širine/dužine pri čemu je usvojeno pravilo da se pozitivne vrijednosti odnose na sjevernu geografsku širinu i istočnu geografsku dužinu. U tablici 16. navedene su utvrđene pozicije svih hrvatskih aerodroma u stupnjevima geografske širine/dužine.

Tablica 16. Geografska pozicija aerodroma u Republici Hrvatskoj

Naziv aerodroma	ICAO oznaka	Geografska širina	Geografska dužina
ZRAČNA LUKA DUBROVNIK / Čilipi	LDDU	42,56135278	18,26824444
AERODROM NA VODI MALI LOŠINJ	LDLM	44,55426111	14,44032778
ZRAČNO PRISTANIŠTE LOŠINJ / otok Lošinj	LDLO	44,56590556	14,39318889
ZRAČNO PRISTANIŠTE VUKOVAR / Borovo Naselje	LDOB	45,38646389	18,96258333
AERODROM OSIJEK / Čepin	LDOC	45,54271389	18,63212778
AERODROM SLAVONSKI BROD / Jelas	LDOR	45,15588889	17,98697222
ZRAČNA LUKA OSIJEK/Klisa	LDOS	45,46266667	18,81015556
AERODROM VINKOVCI / Sopot	LDOV	45,250775	18,75876944
ZRAČNA LUKA PULA / Pula	LDPL	44,89353333	13,92219167
AERODROM NA VODI PULA	LDPP	44,882575	13,84029722
AERODROM VRSAR / Crljenka	LDPV	45,1417	13,63048056
AERODROM GROBNIK / Grobničko polje	LDRG	45,37955833	14,50349444
ZRAČNA LUKA RIJEKA / otok Krk	LDRI	45,21688889	14,57026667
AERODROM OTOČAC/Otočac	LDRO	44,84705556	15,2871
AERODROM NA VODI RIJEKA / Port Rijeka	LDRP	45,32356111	14,42044167
AERODROM NA VODI RAB/Rab	LDRR	44,73491389	14,76437222
ZRAČNO PRISTANIŠTE BRAČ/otok Brač	LDSB	43,28571944	16,67971944
AERODROM HVAR / Hvar I.	LDSH	43,18156944	16,63341389
AERODROM NA VODI HVAR/Jelsa	LDSJ	43,17275	16,70525
AERODROM NA VODI KORČULA/Vela Luka	LDSL	42,96300833	16,692175

Naziv aerodroma	ICAO oznaka	Geografska širina	Geografska dužina
AERODROM NA VODI LUMBARDA	LDSM	42,92857778	17,17574167
ZRAČNA LUKA SPLIT / Kaštela	LDSP	43,53894444	16,29796389
AERODROM NA VODI SPLIT/Resnik	LDSR	43,52605	16,31349722
AERODROM SINJ / Sinj	LDSS	43,70043056	16,671325
AERODROM NA VODI SPLIT/Port Split	LDST	43,50345	16,42400278
AERODROM NA VODI LASTOVO/Ubli	LDSU	42,75089444	16,81317778
AERODROM VARAŽDIN / Varaždin	LDVA	46,29421667	16,38347222
AERODROM ČAKOVEC / Pribislavec	LDVC	46,39209444	16,50033611
AERODROM DARUVAR / Daruvar	LDVR	45,58507222	17,21139722
ZRAČNA LUKA ZAGREB/Pleso	LDZA	45,74293056	16,06877778
ZRAČNA LUKA ZADAR / Zemunik	LDZD	44,10826944	15,34669722
AERODROM ZVEKOVAC	LDZE	45,82317222	16,500125
AERODROM BJELOVAR / Brezovac	LDZJ	45,86084167	16,83574722
AERODROM ZABOK / Gubaševo	LDZK	46,01277222	15,86012778
AERODROM ZAGREB / Lučko	LDZL	45,76677778	15,84869444
AERODROM NA VODI NOVALJA	LDZN	44,57239444	14,87124444

Matrica udaljenosti za slučaj ovdje navedenih aerodroma sastoji se od  $37^2$  polja, odnosno ukupno 1369 polja. Zbog jednake vrijednosti među aerodromima u oba smjera, matrica je simetrična s vrijednostima nula na glavnoj dijagonali matrice. Iz toga slijedi da je potrebno izračunati ukupno 630 jedinstvenih vrijednosti udaljenosti između aerodroma u Hrvatskoj. Kada bi se izračun proširio na veće područje, količina podataka bi bila znatno veća što znači da nema smisla računati svaku pojedinu vrijednost već je potrebo ustanoviti način na koji će se izračunati udaljenost za tako velik broj aerodroma. Iz prikupljenih podataka, udaljenost između pojedinih aerodroma, koji su sada svedeni na geografsku točku na Zemlji, izračunati će korištenjem trigonometrijskih funkcija. Pri tome je pretpostavljen pravilan oblik Zemlje kao sfere, što je opravdano s obzirom na relativno malu razliku u promjeru Zemlje na ekvatoru odnosno početnom meridijanu. Jedna od mogućnosti izračuna udaljenosti točaka na sferi je pomoću kosinusovog poučka za stranice sfernog trokuta. No takav način izračuna nije valjan za male sferne kutove i udaljenosti, budući da je  $\cos(0) = 1$ . Promatrajući Zemlju s opsegom od oko 40 000 kilometara, udaljenosti od nekoliko stotina kilometara među hrvatskim

aerodromima doista predstavljaju relativno male vrijednosti. Zbog toga je korištena haversinusova formula<sup>2</sup> [49]. Trigonometrijska funkcija haversinus definirana je kao

$$\text{haversin}(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (3)$$

Za potrebe ovog izračuna, vrijednosti navedene u tablici 16. preračunate su u radijane. Sljedećim formulama izračunate su vrijednosti udaljenosti među aerodromima. Varijabla  $a$  jednaka je

$$a = \sin^2\left(\varphi_B - \frac{\varphi_A}{2}\right) + \cos \varphi_A \cdot \cos \varphi_B \cdot \sin^2\left(\lambda_B - \frac{\lambda_A}{2}\right), \quad (4)$$

gdje je:

$\varphi_B$  – geografska širina točke B, °,

$\varphi_A$  – geografska širina točke A, °,

$\lambda_B$  – geografska dužina točke B, °,

$\lambda_A$  – geografska dužina točke A, °.

Varijabla  $c$  jednaka je

$$c = 2 \cdot \arctan(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}). \quad (5)$$

Varijabla  $c$  predstavlja međukorak u izračunu, a  $\arctan$  se računa *Excel* funkcijom *atan2* iz koordinata točaka.

Konačna udaljenost između točaka na sferi jednaka je

$$d = R \cdot c, \quad (6)$$

pri čemu je  $R$  radijus Zemlje. Udaljenost  $d$  računa se u istoj mjernoj jedinici kao i vrijednost  $R$ . U ovom izračunu je korištena nautička milja (NM),  $R = 3440$  NM (6371 km) jer se brzina zrakoplova uobičajeno izražava u čvorovima (kt, od engl. *knots*) koji su naziv za jedinicu nautičkih milja po satu. Primjenom navedenih formula izračunata je udaljenost svih aerodroma

---

<sup>2</sup> Haversinusova formula prvenstveno se koristila kod izračuna udaljenosti u navigaciji broda, u vrijeme kad su se trigonometrijske funkcije računale logaritamskim tablicama. Izvedena je iz kosinusovog poučka za stranice sfernog trokuta od koje je točnija kod izračuna manjih udaljenosti na Zemlji.

u Republici Hrvatskoj, a proširiti se može jednostavnim dodavanjem aerodroma na popis u Excel datoteci s njegovim geografskim koordinatama.

### **7.2.2. Trajanje leta**

Obzirom na udaljenosti koje zrakoplov prevali za vrijeme leta, zrakoplovi generalne avijacije često polijeću i slijeću s istog aerodroma. Prema prethodnom poglavlju, udaljenosti bi u tom slučaju bile jednake nuli pa ne bi bilo emisija štetnih tvari u CCD fazi leta, dok bi u stvarnosti zrakoplov odletio i nekoliko sati. Kako bi se eliminirala takva pogreška kod ove vrste automatskog izračuna, dodan je utjecaj trajanja leta u ovaj unaprijeđeni model. Kod leta koji počinje i završava na istom aerodromu, ova komponenta bi u potpunosti zamijenila CCD komponentu iz udaljenosti među aerodromima. U drugim slučajevima, ova komponenta se pribraja kada zrakoplov leti rutama dužim od najkraće udaljenosti među aerodromima te se prema tome računa doprinos emisijama. Budući da je analizom emisijskih faktora uočeno znatno povećanje emisija određenih tvari, emisije „na ruti“ podijelit će se na emisije na najkraćoj mogućoj udaljenosti među aerodroma utvrđenoj na način kao što je navedeno u prethodnom poglavlju. te na emisije van te osnovne rute. Pri tome će se pretpostaviti da zrakoplov između aerodroma leti s osiromašenom smjesom što se i najčešće provodi tek kada zrakoplov dosegne visinu krstarenja. Ostatak vremena koji ne pripada niti LTO fazi niti dijelu najkraćeg krstarenja pretpostaviti će se da se leti režimu krstarenja s bogatom smjesom. Budući da se podatak o vremenu polijetanja i slijetanja bilježi u Dnevniku letenja i Letačkoj knjižici, nije ga potrebno dodatno prikupljati već je dovoljno u model uključiti praćenje trajanja leta i izvršiti navedenu podjelu.

### **7.3. Opis Tier 3A modela**

Unaprijeđenim modelom, izračun emisija štetnih tvari izvodi se na temelju Tier 3A metode za koju je potrebno poznavati aerodrom slijetanja i polijetanja. Podaci o letovima dobivaju se iz spomenutih dokumenata na razini pojedinog leta, a uključuju osnovne informacije nužne za izračun. To su podaci koje je potrebno pribaviti od operatera ili vlasnika zrakoplova i to su jedine informacije koje je potrebno periodički prikupljati.

Za ispravan izračun potrebno je prikupiti podatke o promatranoj floti, a njih može ustupiti nadležna Agencija ili slično upravno tijelo. Podaci o floti sastoje se od registracije zrakoplova te pripadajućeg podatka o tipu zrakoplova te ugrađenom motoru. Ti podaci se zatim

nadopunjuju informacijom o gorivu koje predmetni zrakoplov koristi te informacijom o tipičnoj brzini krstarenja tog tipa zrakoplova. Pojedini zrakoplov nakon prvotnog unosa nije potrebno unositi kod novih izračuna, osim u slučaju promjene motora ili dodjeljivanja registracije drugom zrakoplovu. Na taj način se izrađuje jedna vrsta baze podataka nalik na registar zrakoplova, no sa znatno smanjenom količinom podataka o zrakoplovu. Budući da se danas registri zrakoplova vode u digitalnom obliku, ovu bazu podataka o promatranoj floti moguće je generirati automatskim izvlačenjem podataka iz registra što je jednostavno i ne zahtjeva mnogo vremena.

Ranije je spomenuta važnost utvrđivanja prikladnog LTO ciklusa za izračun, a naglašena je i mogućnost primjene specifičnog LTO ciklusa za pojedini kontinent, regiju, državu ili čak i aerodrom. Zbog toga je trajanje faza LTO ciklusa u ovom modelu definirano kao varijabla, a tablično definiranje omogućuje brzu izmjenu vrijednosti i automatsku primjenu na cijeli set promatranih podataka.

Emisijski faktori su vrlo važan podatak i njihova točnost i pravilno pridruživanje podacima o aktivnosti (letovima) vrlo je važno za dobivanje valjanih rezultata. Oni su također tablično definirani, a unose se jednom za svaki tip motora i razvrstani su prema fazama leta.

Navedenim podacima pridružuje se matrica udaljenosti aerodroma iz koje se učitavaju podaci prema aerodromima navedenim u zapisu o letu. Tim podacima zaokružena je cjelina od 5 vrsti podataka potrebnih za ovaj unaprijeđeni model. Slika 24. grafički prikazuje potrebne podatke.



Slika 24. Grafički prikaz podataka u modelu



Za ovaj unaprijeđeni model izračuna emisija izrađena je Excel datoteka u koju se učitavaju zapisi letova. Udaljenosti aerodroma, podaci o floti, emisijski faktori i trajanje faza LTO ciklusa učitavaju se u izračun i na kraju postupka se dobivaju konačni rezultati emisija štetnih tvari za svaki let. Tako je pomoću široko dostupnog alata kakav je Excel, izrađen složen program za čije korištenje nisu potrebna napredna znanja, a za izračunate rezultate očekuje se znatno viša razina točnosti i detalja.

## 7.4. Model u programu *Excel*

*Microsoft Excel* je program za tablično računanje tvrtke Microsoft. Osim osnovnog računanja, program omogućuje crtanje dijagrama iz upisanih podataka, stvaranje *pivot* tablica koje sažimaju i pregledno grupiraju podatke iz velikih i nepreglednih tablica te programiranje *macro* naredbi pomoću programskog jezika *Visual Basic for Applications*. Brojne ugrađene funkcije računanja, logičkih operacija i naredbi omogućuju napredno učitavanje i razvrstavanje podataka, njihovu obradu te na kraju interaktivan prikaz rezultata. U *Excelu*, datoteka je podijeljena u listove koji su svaki za sebe jedna tablica. Listove je moguće međusobno povezivati i na taj se način praktički stvara jedna baza podataka s nizom povezanih tablica.

### 7.4.1. *Ulazni podaci*

Potrebni ulazni podaci prikazani su tablicom 17.

Tablica 17. *Ulazni podaci modela*

Podatak	Primjer	Opis / napomena
Datum leta	14.10.2011.	
Tip zrakoplova	C172	Oznaka tipa zrakoplova prema ICAO popisu.
Registracija zrakoplova	9A DZG	Prva dva znaka označuju državu (9A je Hrvatska, S5 je Slovenija, itd.). Preostala kombinacija 3 znaka jedinstvena su za zrakoplov.
ICAO oznaka aerodroma polijetanja	LDZL	Prva dva slova označuju državu, LD je Hrvatska, ED je Njemačka, itd.). Druga dva znaka označavaju aerodrom (ZL je Zagreb Lučko, VA je Varaždin, itd.).
ICAO oznaka aerodroma slijetanja	LDVA	
Vrijeme početka leta	13:30	Vrijeme koje Excel prikazuje u željenom obliku, no u memorira se kao dan od 0 do 1 (npr. 12:00 sati se memorira kao 0,5) što je bitno za daljnji izračun.
Vrijeme završetka leta	16:00	
Broj ciklusa	5	Broj slijetanja (i polijetanja).

Datum leta koristi se za filtriranje kod prikaza konačnih rezultata. Prema registraciji zrakoplova se pretraživanjem dostupnih podataka na internetu ili službenim putem iz registra zrakoplova mogu odrediti tip zrakoplova i/ili ugrađen motor. Ako registracija iz nekog razloga nije poznata, ugrađeni motor se može, s nešto manjom preciznošću, odrediti samo iz podatka o tipu zrakoplova. ICAO oznake aerodroma jedinstvene su u svijetu i služe za određivanje minimalno prijedene udaljenosti na letu. Iz vremena početka i kraja leta računa se trajanje leta, a broj ciklusa predstavlja broj ostvarenih LTO ciklusa.

Tablica 18. prikazuje podatke o jednom od zrakoplova promatrane flote. Podatak kojim se povezuju ostale tablice je registracija što predstavlja *one-to-many* poveznicu. Pri tome zapis iz tablice 18. može biti povezan na više zapisa tablice 17., dok se jedan zapis iz tablice 17. povezuje na samo jedan zapis iz tablice 18.

Tablica 18. Baza podataka o promatranoj floti zrakoplova

Podatak	Primjer	Opis / napomena
Registracija zrakoplova	9A-DAD	Objašnjeno ranije.
Tip zrakoplova	C172	
Ugrađeni motor(i)	IO-360	Slovne oznake određuju tip motor, brojkom je navedena obujam motora u kubičnim inčima.
Broj motora	1	broj ugrađenih motora koji je kod GA zrakoplova najčešće 1 ili 2.
Tipična brzina krstarenja u čvorovima	122	Brzina leta koja se koristi za krstarenje u uobičajenim uvjetima leta.
Korišteno gorivo	AVGAS 100LL	Gorivo koje može biti AVGAS (aviobenzin), MOGAS (benzin za cestovna vozila), dizelsko gorivo itd.

Prema tipu ugrađenog motora određuju se prikladni emisijski faktori, izmjereni za taj motor ili motor sličnih karakteristika (snage, obujma, broja cilindara, itd.). Prikladni emisijski faktori

odabiru se iz dostupnih podataka iz Priloga 1. Prema korištenom gorivu, određuju se emisijski faktori za emisije ugljikova dioksida koji prvenstveno ovise o gorivu, a prikazani su u tablici 9.

#### 7.4.2. Podjela trajanja leta na faze

Emisije u LTO ciklusu računaju se posebno jer je potrebno razdvojiti glavni LTO ciklus koji uključuje voženje na početku i kraju leta te ostale cikluse. Zbog dvije vrste podataka potrebnih za taj dio izračuna, - trajanje faza ciklusa i emisijski faktori iz kojih se za svaku fazu i svaki tip motora računaju potrošeno gorivo i emisija pojedinih štetnih tvari. Izračunati podaci učitavaju se u glavnu tablicu prema broju ostvarenih ciklusa u letu.

Uz emisije štetnih tvari u ciklusima, računa se i potrošeno vrijeme u ciklusima. Od ukupnog trajanja leta, vrijeme potrošeno na LTO cikluse oduzima se i za preostalo vrijeme pretpostavlja se da je potrošeno na let u krstarenju. Ukupno trajanje leta utvrđuje se kao razlika vremena polijetanja i slijetanja

$$t_{total} = t_{arr} - t_{dep}. \quad (7)$$

Vrijeme potrošeno na cikluse jednako je  $t_{LTO}$ ,

$$t_{LTO} = t_{full_{LTO}} + p \cdot t_{partial_{LTO}}, \quad (8)$$

pri čemu je  $t_{full_{LTO}}$  vrijeme trajanja jednog punog ciklusa,  $p$  je broj djelomičnih ciklusa, a  $t_{partial_{LTO}}$  je vrijeme trajanja jednog djelomičnog ciklusa. Iz navedenog slijedi ukupno trajanje CCD faze,  $t_{CCD}$

$$t_{CCD} = t_{total} - t_{LTO}. \quad (9)$$

CCD faza uključuje drugi dio penjanja na visinu krstarenja, krstarenje te spuštanje s visine za krstarenje do finalnog prilaza. Međutim, ta faza kod letova zrakoplova generalne avijacije izvodi se bitno drugačije nego li kod komercijalnih zrakoplova. Komercijalni zrakoplovi lete na najkraće mogućim rutama između dvaju aerodroma te vrlo rijetko lete van tih ruta. Suprotno tomu, zrakoplovi generalne avijacije, osim izvršenja funkcije preleta s jednog na drugi aerodrom, često lete van rute. Takvi letovi mogu biti trenažni letovi u za to namijenjenoj zoni, panoramski letovi, izbacivanje padobranaca i slično.

Zbog toga, krstarenje je podijeljeno na dvije vrste krstarenja. Prvo je krstarenje u dinamičnim uvjetima pri češćim promjenama snage i zbog toga korištenom bogatom smjesom goriva. Drugi dio krstarenja pridružen je letu na direktnoj ruti u kojem se zrakoplov nalazi u ravnotežnom

horizontalnom letu pri kojem se uobičajeno osiromašuje smjesa goriva i zraka. Učitavanjem udaljenosti između aerodroma određuje se minimalno potrebna udaljenost za prelet na promatranom letu. Iz podataka o zrakoplovu učitava se tipična brzina u krstarenju i zatim se računa vrijeme provedeno u krstarenju osiromašenom smjesom,  $t_{CCD_{lean}}$

$$t_{CCD_{lean}} = \frac{d_{AB}}{v_z}, \quad (10)$$

pri čemu je  $d_{AB}$  udaljenost između predmetnih aerodroma A i B, a  $v_z$  je tipična brzina krstarenja zrakoplova Z. Preostalo vrijeme pripisuje se krstarenju bogatom smjesom,  $t_{CCD_{rich}}$

$$t_{CCD_{rich}} = t_{LTO} - t_{CCD_{lean}}. \quad (11)$$

#### 7.4.3. Izračun emisija štetnih tvari

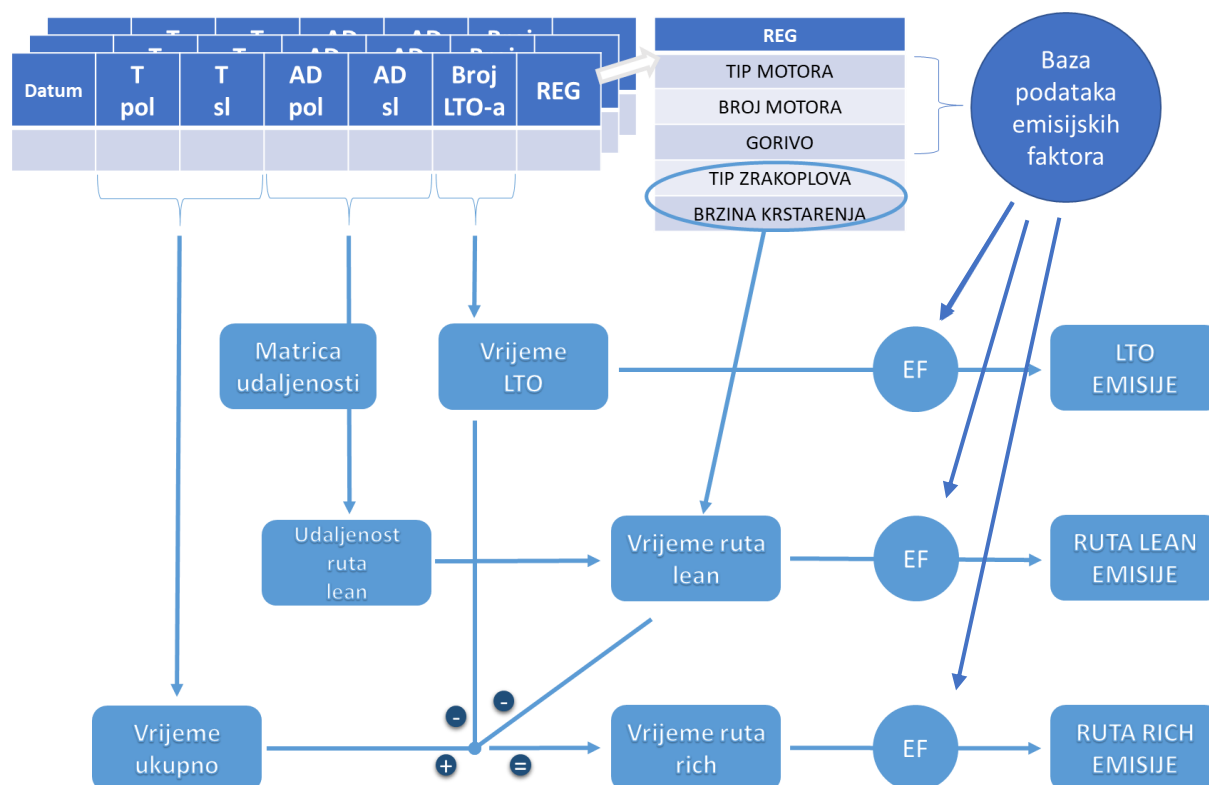
Nakon provedene podjele vremena, primjenom emisijskih faktora računaju se emisije u letu  $n$ , tvari  $X$  kao suma emisija promatrane tvari po fazama  $m$ :

$$E_{X_n} = \sum_m (t_m \cdot EF_{X_m}). \quad (12)$$

Kad se postupak provede za sve letove, računa se ukupna količina emisija štetnih tvari za sve letove  $n$ :

$$E_X = \sum_n E_{X_n}. \quad (13)$$

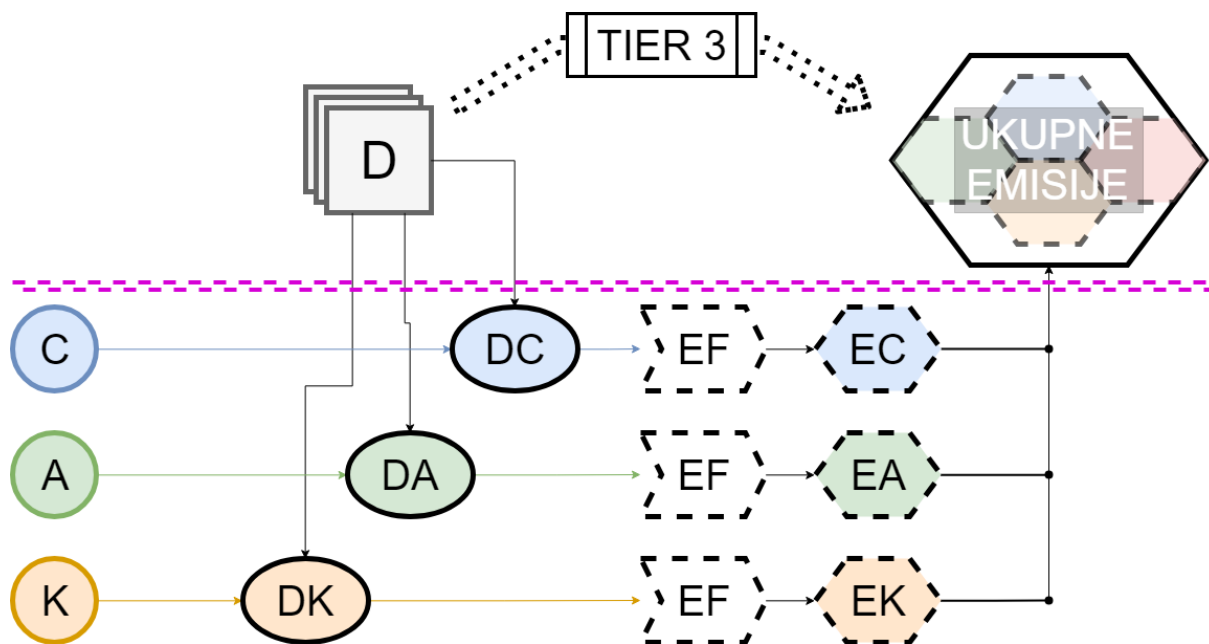
Slika 25. prikazuje sadržaj pojedinih tablica i njihovu međusobnu povezanost.



Slika 25. Organizacija baze podataka

Prilična složenost ovog modela uzrokovana je jednostavnim ulaznim podacima koje je potrebno proširiti dostupnim informacijama iz povezanih izvora. Tako se računaju emisije štetnih tvari i omogućuje prikaz u više kategorija – ovisno o fazi leta, vrsti tvari, tipu zrakoplova, odabranom vremenskom razdoblju itd.

Slika 26. prikazuje tijek informacija u *Excel* datoteci ovog unaprijeđenog modela. Pri tome je korisniku vidljiv dio programa iznad ružičaste linije, dakle unos podataka i rezultati. Između te dvije krajnje faze provodi se izračun Tier 3A metodom, koja je simbolično prikazana u dijelu sheme ispod ružičaste linije.



Slika 26. Korisnička shema unaprijeđenog modela izračuna

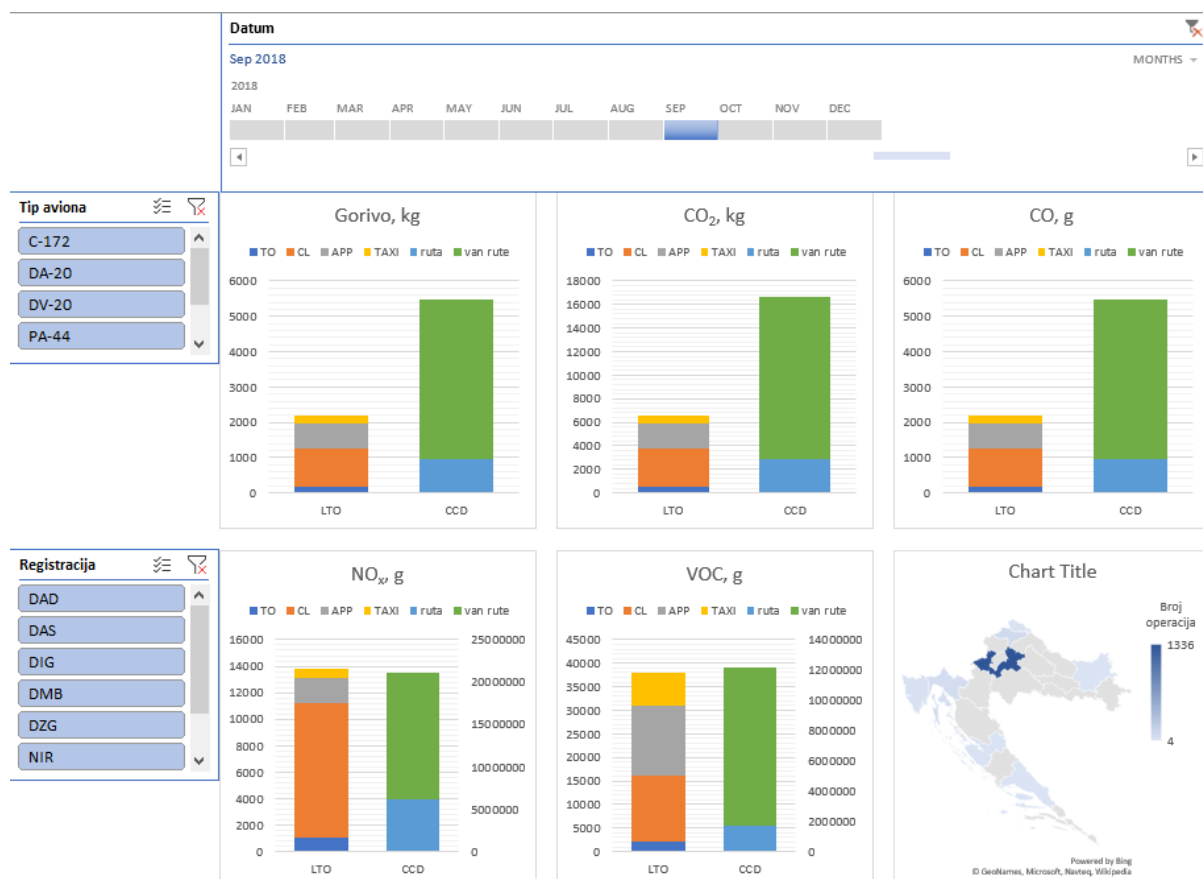
Oznake C, A i K označuju ulazne parametre LTO ciklusa (C), udaljenosti aerodroma (A) i parametre tipične za krstarenje (K). Tim podacima nalet iz Dnevnika letenja (D) dijeli se među tim fazama.

Primjenom emisijskih faktora (EF) računaj se udjeli emisija nastali u ciklusima (EC), krstarenju (EK) te udio korištene osiromašene smjese i pripadajućih emisija (EA).

#### 7.4.4. Prikaz rezultata

Jedan od razloga korištenja programa *Excel* u ovom radu je mogućnost brzog razvrstavanja i obrade velike količine podataka. Nakon toga, rezultati se mogu prikazati na *dashboardu*. Osim preglednosti rezultata, vrlo je bitna funkcija interaktivnosti rezultata gdje se u nekoliko brzih koraka rezultati mogu prilagođavati na više načina.

Na slici 27. nalazi se zaslonski snimak navedenog *dashboarda*. Središnji dio čine dijagrami količine emisija štetnih tvari i potrošenog goriva, odvojeni za cikluse i krstarenje te s izraženim emisija štetnih tvari po fazama.



Slika 27. Prikaz rezultata pomoću interaktivnog dashboarda

Oko dijagrama nalaze se interaktivni *sliceri* kojima se brzo filtriraju podaci po tipu zrakoplova, registraciji ili prema vremenskom razdoblju. Zanimljiv detalj je dijagram s istaknutim županijama Republike Hrvatske. Budući da je županija najniža razina prikaza na karti, županije su pridružene popisu aerodroma ovisno o tome u kojoj županiji se pojedini aerodrom nalazi. Karta prikazuje broj operacija slijetanja ili polijetanja na aerodromima, odnosno u županijama.

## 7.5. Opis Tier 3B modela

### 7.5.1. Podaci o putanji leta zrakoplova

Zahvaljujući naprednim mogućnostima programa *Excel*, predstavljeni model moguće je modificirati i izraditi alat koji će emisije računati na Tier 3B razini. Za najveću razinu potrebno je poznavati cijelu putanju leta zrakoplova. Zapis putanje zrakoplova bilježi se u crnoj kutiji zrakoplova, a osim toga, kontrola leta također bilježi podatke o radarskim očitavanjima. To su dva službeno moguća izvora podataka o putanji zrakoplova, no oni nisu javno dostupni. S druge strane, popularni internetski servisi za praćenje zrakoplova, kao što je *FlightRadar24* pružaju



te informacije, samo u manjem broju zabilježenih podataka ili u smanjenoj rezoluciji bilježenja. Usprkos tome, kvaliteta podataka dovoljna je za demonstraciju mogućnosti *Excel* alata, a utvrđeni principi se kasnije mogu poboljšati korištenjem podataka iz službenih izvora. *FlightRadar24* prikuplja podatke s više od 20 000 *ADS-B* (engl. *Automatic dependent surveillance – broadcast*) prijamnika iz cijelog svijeta, objedinjava ih i prikazuje na internetskom sučelju ili putem *smartphone* aplikacija. *ADS-B* prijamnici prepoznaju podatke koje šalju zrakoplovi opremljeni *ADS-B* predajnicima, a radi se o tehnologiji nadzora koja određuje poziciju zrakoplova pomoću satelitske navigacije i periodično je emitira zajedno s drugim informacijama o zrakoplovu [50].

Zbog raširene mreže prijamnika, određena područja su pokrivena do razine zemlje pa se podaci o letu počinju bilježiti odmah nakon uključivanja uređaja u zrakoplovu. To je omogućilo korištenje tih podataka i u znanstveno-istraživačke svrhe, što potvrđuje i literatura [51].

Podaci o putanji leta mogu se preuzeti sa internetske stranice u CSV (engl. *Comma-separated values*) formatu. CSV zapis predstavlja podatke u jednom stupcu, pri čemu je svaki redak jedan zapis, a stupci su odjeljeni samo zarezom. Preuzete .csv datoteke sa stranice *FlightRadar24* sadrže podatke opisane u tablici

Tablica 19. Podaci u CSV datoteci preuzete s FlightRadar24 stranice

Podatak	Primjer	Opis / napomena
<i>Timestamp</i>	1538049109	Vremenska oznaka prema <i>UNIX Epoch</i> vremenu koje broji sekunde od ponoći, 1.1.1970 godine.
UTC datum i vrijeme	2018-09-27T11:51:49Z	Datum i vrijeme zapisa prema Koordiniranom univerzalnom vremenu
<i>Callsign</i>	OKTWI	Pozivna oznaka zrakoplova koju zrakoplov odašilje
<i>Position</i>	49.114105,19.733603	GPS koordinate točke zapisa
<i>Altitude</i>	9400	Visina u stopama (1 stopa = 0,3048 metara)
<i>Speed</i>	130	Brzina zrakoplova u čvorovima (1 čvor = 1852 m/s)
<i>Direction</i>	277	Smjer leta u stupnjevima (0 – 360°)

## 7.6. Model u programu Excel

Podaci iz prošlog poglavlja učitavaju se u *Excel* datoteku i zatim se razvrstavaju u stupce uz pomoć funkcije *Text to Columns*, a korištenjem snimljene *Macro* naredbe, postupak razvrstavanja podataka se automatizira. Za razliku od Tier 3A modela kod kojeg jedan red predstavlja jedan let, kod ovog modela jedan red predstavlja jednu snimljenu točku u letu.

Koristeći prethodni način izračuna emisija, za uzastopne parove točaka izračunava se brzina penjanja između dvije točke, prema formuli:

$$v_{climb AB} = \frac{H_B - H_A}{t_B - t_A}, \quad (14)$$

pri čemu su  $H_B$  i  $H_A$  visine u točkama zapisa A odnosno B, a  $t_B$  i  $t_A$  su pripadajuće vremenske oznake pojedinog zapisa.

Vrijeme leta između točaka zapisa A i B računa se prema razlici vremenskih oznaka  $t_B$  i  $t_A$ .

Udaljenost između točaka zapisa A i B računa se koristeći ranije opisanu haversinusovu formulu (opširnije u poglavlju 7.2.1).

### 7.6.1. Određivanje režima rada motora zrakoplova

Utvrđena brzina penjanja između dvije zapisane točke koristi se za utvrđivanje režima rada motora odnosno fazu leta zrakoplova između te dvije točke. U programu *Excel* to se izvodi uvjetnom naredbom *if*, koja se u *Excelu* izvršava funkcijom *IFS*. Tablica 20. prikazuje redoslijed izvođenja *if* naredbe. Prva istinita tvrdnja završava proces i odabire prikladan režim rada motora.

Tablica 20. Kriteriji određivanja režima rada motora prema brini penjanja

Vclimb,AB, ft/min	Vclimb,AB, m/s	Režim rada motora
$< (-300)$	$< (-1,524)$	Prilaz (APP) 45 % snage
$<  \pm 100 $	$<  \pm 0,508 $	Krstarenje osiromašenom smjesom (CR LEAN) 65 % snage
$\leq  \pm 300 $	$<  \pm 1,524 $	Krstarenje bogatom smjesom (CR RICH) 65 % snage
$> 500$	$> 2,54$	Polijetanje (TO) 100 % snage
$> 300$	$> 1,524$	Penjanje (CLIMB) 85 % snage

U tablici nedostaje voženje po tlu jer toga dijela leta u pravilu nema u zapisu leta zrakoplova generalne avijacije, jer oni postaju vidljivi tek na nešto većim visinama iznad aerodroma. Logika odlučivanja prilagođena je najčešćim načinu leta zrakoplova generalne avijacije. Zrakoplov nakon polijetanja najčešće nastavlja let s punom snagom motora sve do postizanja željene visine leta, stoga je za sva penjanja veća od 500 ft/min (2,54 m/s) pretpostavljeno da se odvijaju pri punoj snazi. Primjerice, uobičajena brzina penjanja zrakoplova Cessna 172 iznosi nešto više od 700 ft/min (3,556 m/s).

Za manja penjanja od 300 do 500 ft/min (1,524 – 2,54 m/s) pretpostavlja se da je dostatna manja snaga motora od 85 %, odnosno koriste se emisijski faktori za fazu penjanja.

Za vertikalne brzine od -300 do +300 ft/min (-1,524 - +1,524 m/s) pretpostavlja se da zrakoplov leti u krstarenju s malo promjenjivom visinom leta pa se pretpostavlja krstarenje bogatom smjesom i snagom od 65 %.

Za brzine penjanja oko 0 ft/min (0 m/s), odnosno od -100 do +100 ft/min (-0,508 do + 0,508 m/s) pretpostavlja se let na ruti. Pri tome je najčešće zrakoplov u ravnotežnom horizontalnom letu i opravdano je pretpostaviti da leti osiromašenom smjesom.

Posljednji mogući režim leta je spuštanje vertikalnom brzinom spuštanja više od 300 ft/min (1,524 m/s) što je vrlo vjerojatno faza prilaza, tj. motor je u režimu rada s 45 % snage.

#### **7.6.2. Učitavanje preostalih podataka**

Učitavanje podataka o zrakoplovu istovjetno je modelu Tier 3A, dakle prema registraciji zrakoplova iz dodatne tablice učitavaju se podaci o tipu zrakoplova, vrsti motora i broju motora te o korištenom gorivu (Tablica 18.)

Emisijski faktori istovjetni su emisijskim faktorima modela Tier 3A, jer su trenutno najkompletniji od svih javno dostupnih emisijskih faktora. Emisije ugljikova dioksida također se određuju prema prethodno utvrđenim emisijskim faktorima u ovisnosti o korištenom gorivu (opširnije u poglavlju 6.2.).

## 8. REZULTATI I USPOREDBA

### 8.1. Metoda izračuna i usporedbe rezultata

Opisani modeli primijeniti će se na dostupnim podacima i usporediti s Tier 1 metodom izračuna. Za model izračuna Tier 3A koristiti će se podaci koje su nesebično ustupili kolege s Fakulteta prometnih znanosti, a odnose se na Dnevnik letenja Hrvatskog zrakoplovnog nastavnog središta (HZNS) za 2017. godinu. Za Tier 3B model koristiti će se podaci preuzeti sa stranice FlightRadar24. Budući da podaci na toj stranici nisu kompletni i nema ih mnogo za zrakoplove generalne avijacije, prvo će se na stranici pronaći letovi zrakoplova koje je koristio HZNS u 2017. godini. Nakon toga, isti letovi pronaći će se u Dnevniku letenja HZNS-a. Tako pribavljeni podaci učitati će se u pripremljene *Excel* datoteke i usporediti će se dobiveni rezultati. Na kraju će se na rezultat potrošenog goriva u letu dobivenog Tier 3B modelom primijeniti emisijski faktori za Tier 1 razinu i usporediti će se na taj način izračunate emisije štetnih tvari. Nakon provedenog cijelog postupka na više letova, moći će se donijeti odgovarajući zaključak o bitnim razlikama ovih modela kao i načini primjene kod izrade inventara emisija.

### 8.2. Let 1

Let 1 je let zrakoplova tipa *Cessna 172N*, registracije 9A-DMG. U zrakoplov je ugrađen jedan klipni motor Avco Lycoming O-360 od 119 kW (160 KS), a koristi gorivo AVGAS 100LL. Tipična brzina krstarenja zrakoplova je oko 63 m/s (122 čvora). Navedeni podaci koristit će se za sve modele izračuna za Let 1.

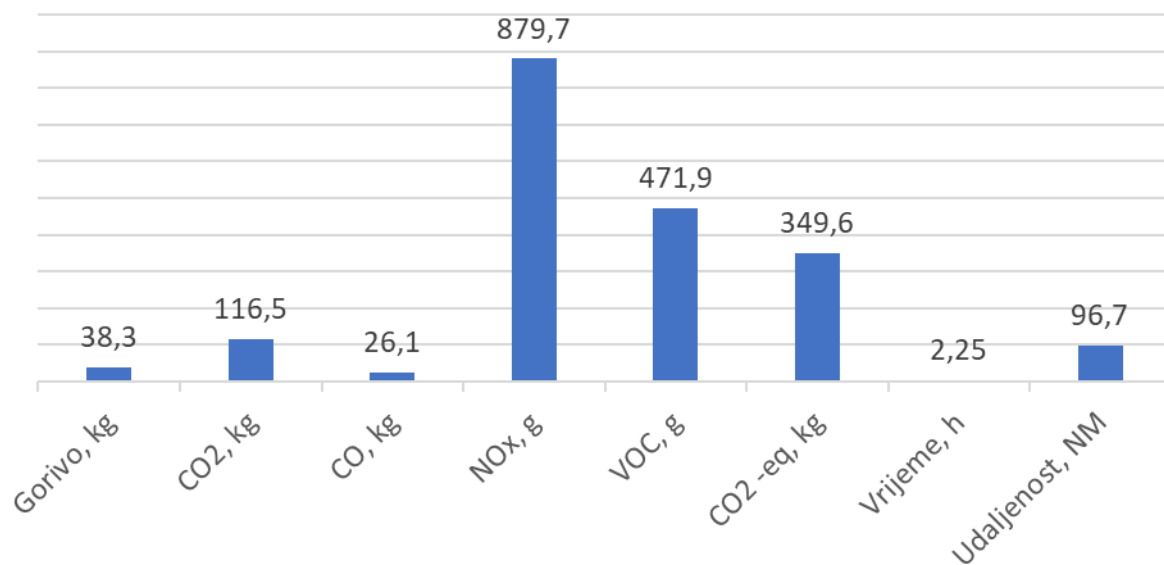
#### 8.2.1. Tier 3A model izračuna za Let 1

Ulazni podaci za Tier 3A model čine podaci iz Dnevnika letenja HZNS-a. Iako je model namijenjen za izračun s velikim brojem podataka, za potrebe ove analize u *Excel* datoteku upisan je samo jedan promatrani let. Ulazni podaci prikazani su tablicom 21.

Tablica 21. Ulazni podaci Leta 1 za Tier 3A model

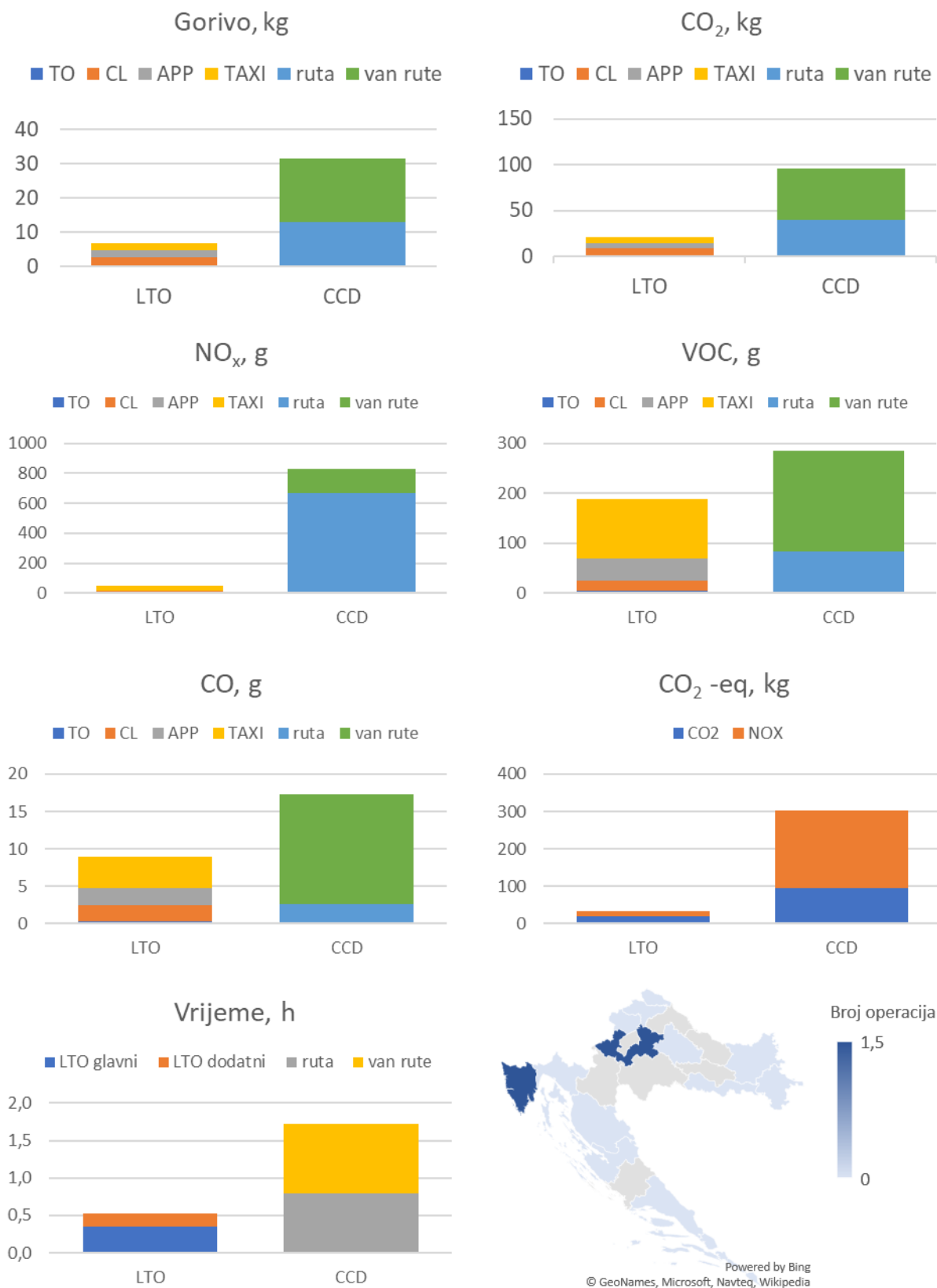
Datum leta	03.11.2017.
Tip zrakoplova	C172
Registracija zrakoplova	9A DMG
ICAO oznaka aerodroma polijetanja	LDZL
ICAO oznaka aerodroma slijetanja	LDPL
Vrijeme početka leta	09:00
Vrijeme završetka leta	11:15
Broj ciklusa	3

Za jednostavniji usporedbu s drugim modelima, izrađen je dijagram na kojem su navedeni konačni podaci o procijeni potrošnje goriva, udaljenosti između aerodroma, trajanju leta te procijeni emisija ugljikova dioksida, ugljikova monoksida, dušikovih oksida, hlapivih organskih spojeva i izračuna emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida. Dijagram se nalazi na slici 28. Vrijeme je prikazano u satima zbog lakše usporedbe rezultata, a udaljenost je prikazana u nautičkim miljama (NM) koje se uobičajeno koriste u zrakoplovstvu, iako je SI jedinica duljine metar, a vremena sekunda.



Slika 28. Ukupni rezultat Tier 3A modela za Let 1

Nakon unosa podataka i osvježavanja izračuna pomoću Pivot tablica i *Dashboarda* s prikazom podataka, izračunati su rezultati emisija na navedenom letu. Rezultati su grafički prikazani na slici 29., a u preuzeti su iz *Dashboarda* modela.

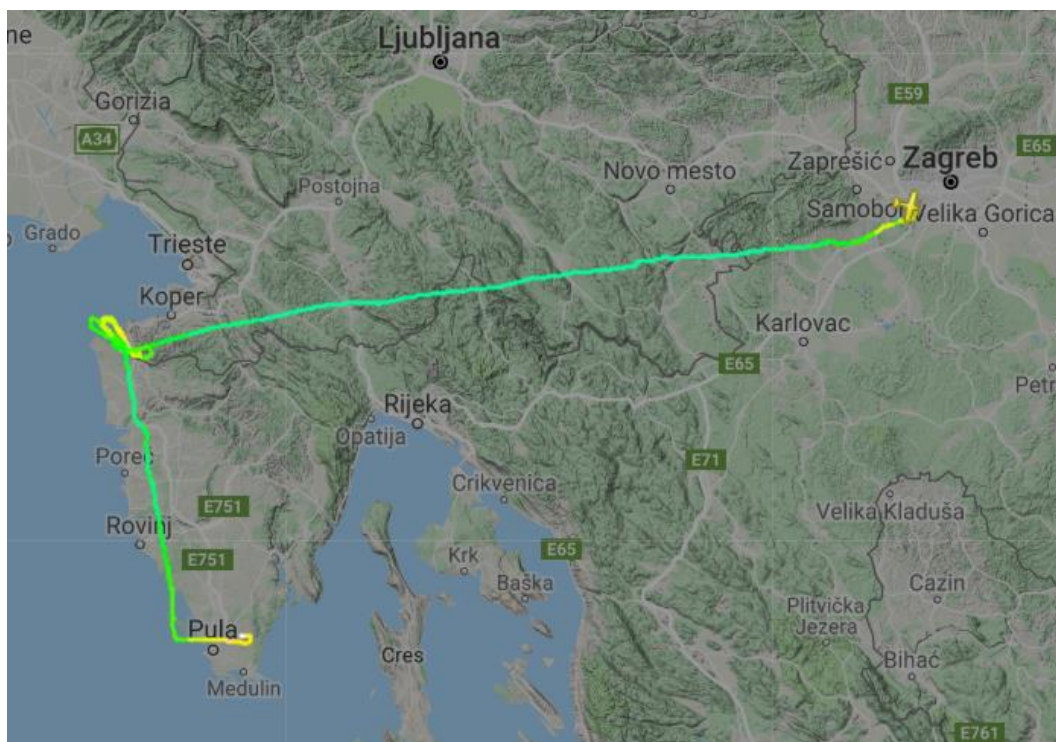


Slika 29. Prikaz rezultata Tier 3A modela za Let 1



### 8.2.2. Tier 3B model izračuna za Let 1

Za Tier 3B model izračuna potrebno je imati informacije i podatke o čitavoj putanji leta. U tu svrhu, podaci za ovaj let su pronađeni na i preuzeti sa stranice *FlightRadar24*. Slika 30. prikazuje putanju zrakoplova preuzetoj sa stranice.



Slika 30. Putanja zrakoplova prikazana na stranici *FlightRadar24*

Iz slike je vidljivo da je zrakoplov prvo letio prema aerodromu Portorož gdje je obavio nekoliko slijetanja i polijetanja. Nakon toga je produžio prema Aerodromu Pula kao konačnom odredištu. Žuti dijelovi krivulje označuju let na manjim visinama, najčešće nakon polijetanja i u prilozu, a zelenom bojom označeni su dijelovi leta na većim visinama.

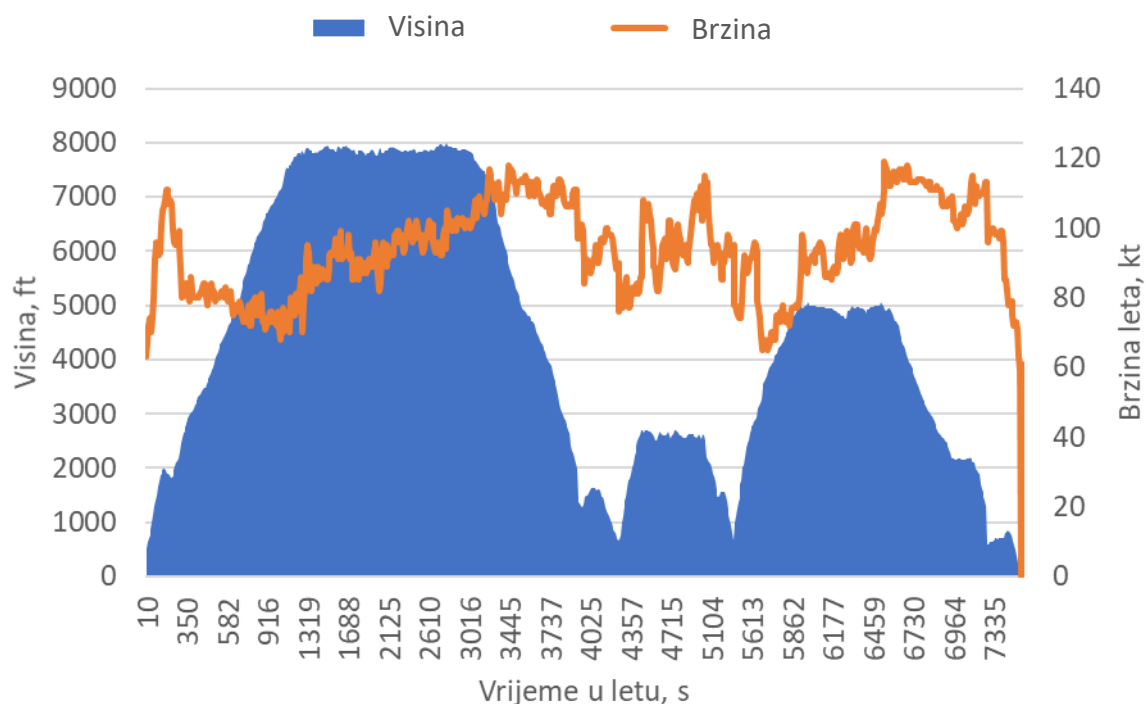
Za ovaj model potreban je cijeli niz očitanih točaka iz leta, stoga su u tablici 22. navedeni samo nekoliko točaka za primjer. Pomoću *Excel* funkcija određene su najmanje, prosječne i najveće vrijednosti razlike vremena između pojedinih zapisa. Za podatke Leta 1, najmanja rezolucija očitavanja iznosi 6 s, maksimalna 86 s, a prosječna vrijednost iznosi 9,9 s.

Tablica 22. Dio ulaznih podataka za Tier 3B model za Let 1

Timestamp	UTC	Callsign	Position	Position2	Altitude	Speed	Direction
1509700707	2017-11-03T09:18:27Z	9ADMG	45,76502	15,85783	425	61	106
1509700717	2017-11-03T09:18:37Z	9ADMG	45,7641	15,86171	525	63	108
1509700727	2017-11-03T09:18:47Z	9ADMG	45,76305	15,8658	625	67	110
1509700737	2017-11-03T09:18:57Z	9ADMG	45,76188	15,87044	700	72	110
1509700743	2017-11-03T09:19:03Z	9ADMG	45,76131	15,87256	750	74	110
1509700753	2017-11-03T09:19:13Z	9ADMG	45,75959	15,87689	875	70	131
1509700763	2017-11-03T09:19:23Z	9ADMG	45,75691	15,8794	1000	74	157
1509700773	2017-11-03T09:19:33Z	9ADMG	45,75316	15,8802	1125	80	177

Ulazni podaci su u tablici prikazani u razvrstanom obliku radi preglednosti. Kao takvi učitavaju se u program za izračun emisija. Nakon preuzimanja nalaze se u CSV obliku, sadržajno su jednaki no umjesto više stupaca nalaze se u jednom stupcu i podijeljeni su zarezima.

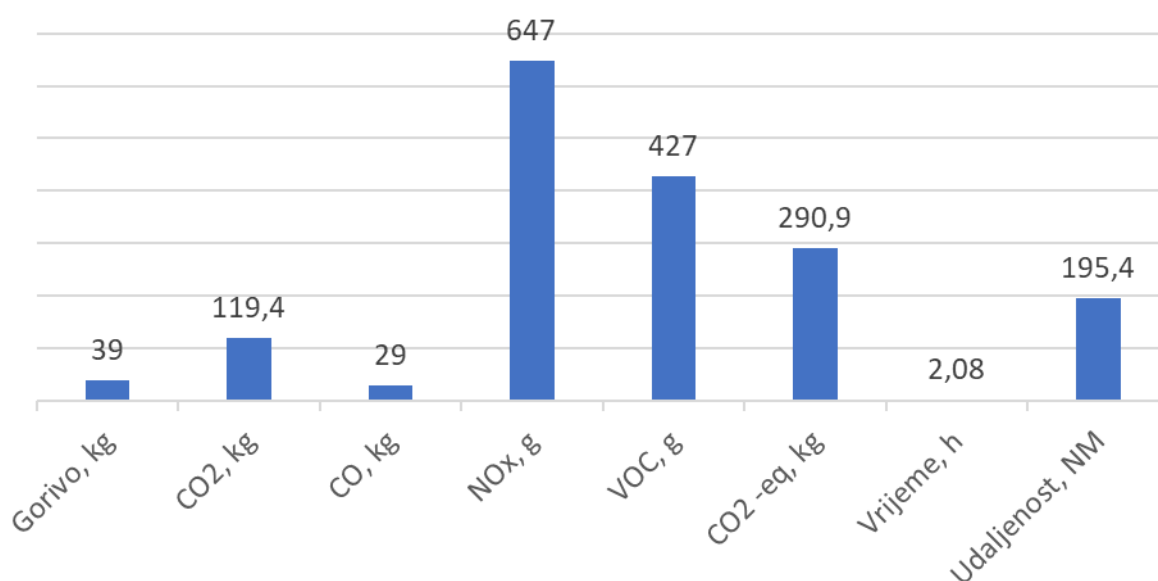
Nakon učitavanja, iz podataka se računaju količine emisija štetnih tvari, vrijeme leta te prijedena udaljenost. Zahvaljujući poznatim parametrima leta (visina, brzina, smjer leta) tijekom cijelog snimljenog leta, iz podataka se mogu izvesti dijagrami profila leta. Dijagram visine leta i brzine u odnosu na tlo prikazuje slika 31. Jedinice na dijagramu odgovaraju preuzetim ulaznim podacima te se u zrakoplovstvu uobičajeno koriste, iako je u SI sustavu mjerna jedinica visine metar, a brzine metar u sekundi.



Slika 31. Profil Leta 1 prema FlightRadar24 podacima

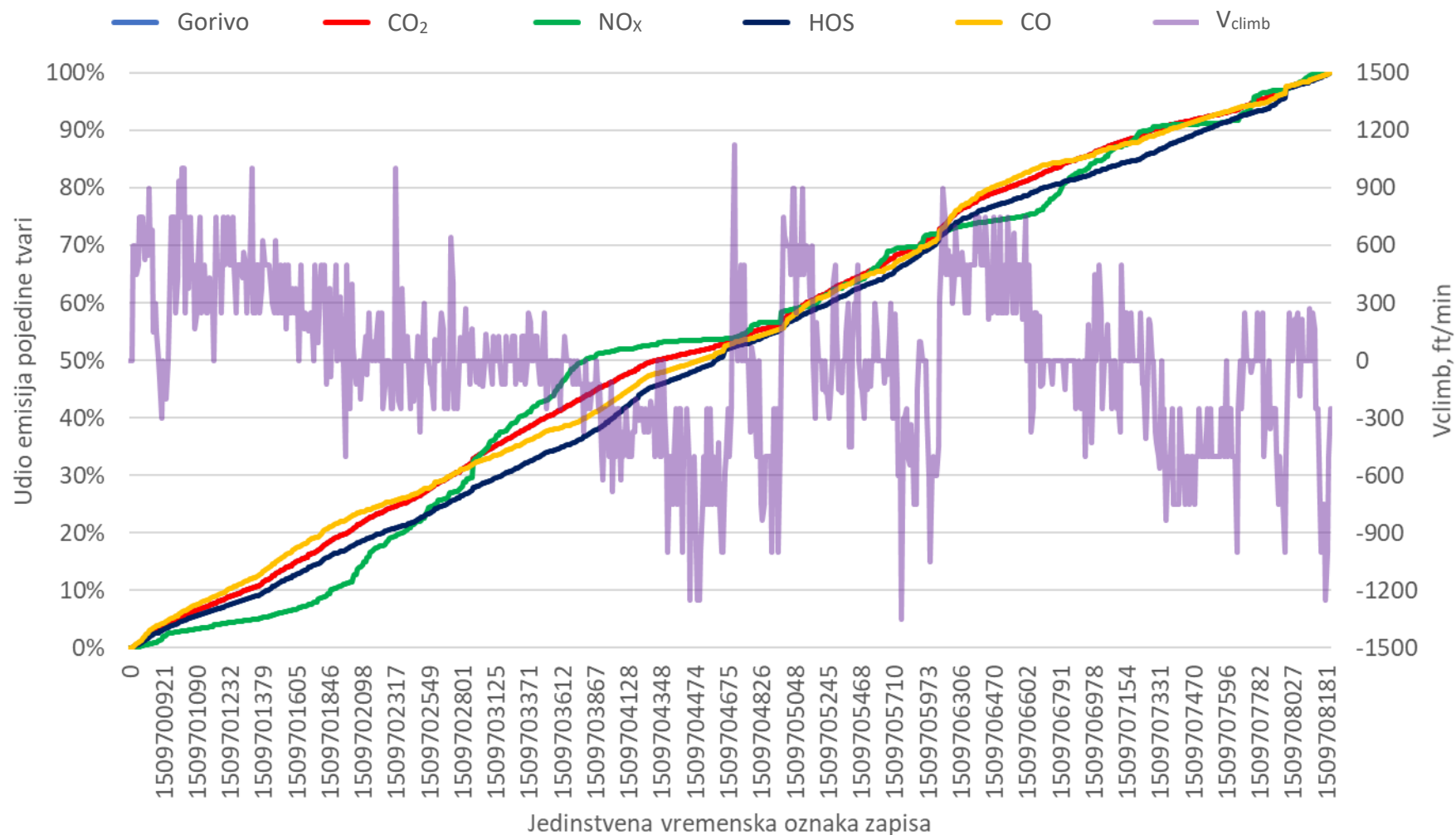
Iz profila leta jasno su uočljiva dva međuslijetanja, što s početnim polijetanjem i slijetanjem na kraju čini 3 ostvarena ciklusa. Nadalje, trajanje od otprilike 7500 s je oko 2,1 sat. Broj ciklusa i trajanje leta odgovara parametrima navedenim u prethodnom poglavlju, dakle može se zaključiti da se doista radi o istom letu.

Za usporedbu s drugim modelima izračuna, potrebni su ukupni iznosi emisija na ovom učitanoj letu, a prikazani su na slici 32.



Slika 32. Ukupni rezultat Tier 3B modela za Let 1

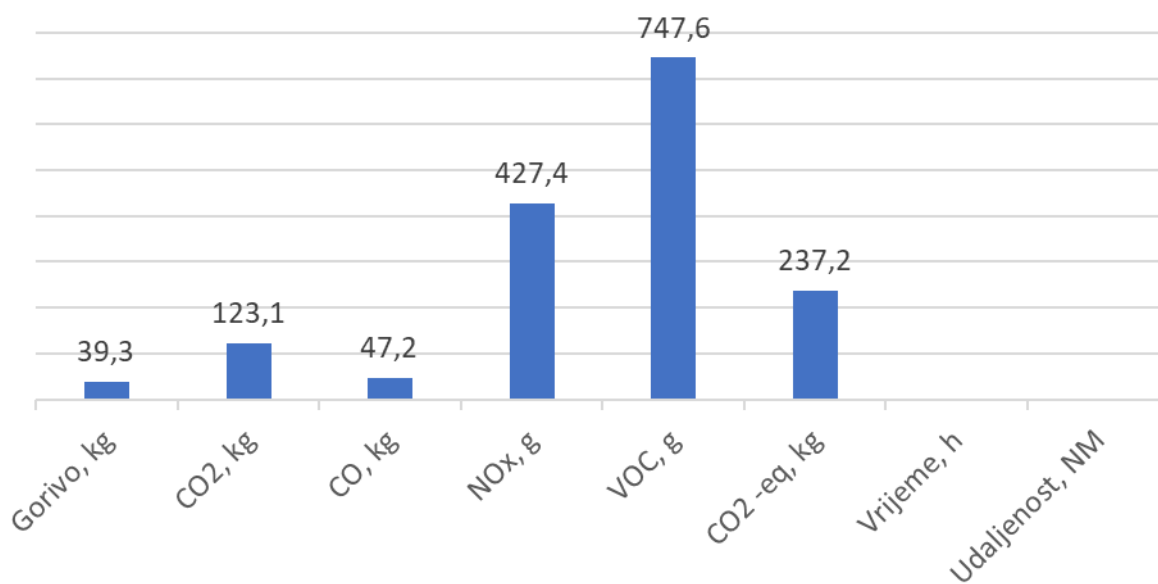
Budući da se ovim modelom emisije procjenjuju prema putanji leta, rezultate je moguće prikazati za svaku točku zapisa. Tako se mogu analizirati emisije štetnih tvari i trendovi promjena tijekom cijelog leta. Slika 33. prikazuje rezultat dobiven Tier 3B modelom. Ljubičastom linijom prikazana je vertikalna brzina zrakoplova. Vertikalna brzina računa se dijeljenjem razlike visina dvaju uzastopnih zapisa s razlikom jedinstvenog vremenskog zapisa, prema formuli (14). Iz prikazanog dijagrama moguće je uočiti ovisnost emisija štetnih tvari o vertikalnoj brzini zrakoplova. Primjerice, emisije dušikovih oksida smanjuju se kada je zrakoplov u penjanju, a znatno rastu kada zrakoplov krstari osiromašenom smjesom.



Slika 33. Prikaz kumulativnih rezultata Tier 3B modela za Let 1

### 8.2.3. Tier 1 model izračuna za Let 1

Za Tier 1 model procijene emisija, kao ulazni podatak potrebna je isključivo količina goriva potrošenog na letu. Stvarni podatak po letu nije dostupan, pa se pretpostavlja da približno odgovara izračunatoj potrošnji goriva Tier 3B modelom. Za Let 1, potrošnja goriva na letu iznosi 39,3 kilograma. Primjenom Tier 1 emisijskih faktora, izračunavaju se rezultati prikazani slikom 34. Na dijagramu nedostaju podaci o trajanju leta i udaljenosti, jer nisu potrebni za Tier 1 model izračuna pa ih nema među ulaznim podacima, a samim time, ne mogu se izračunati.

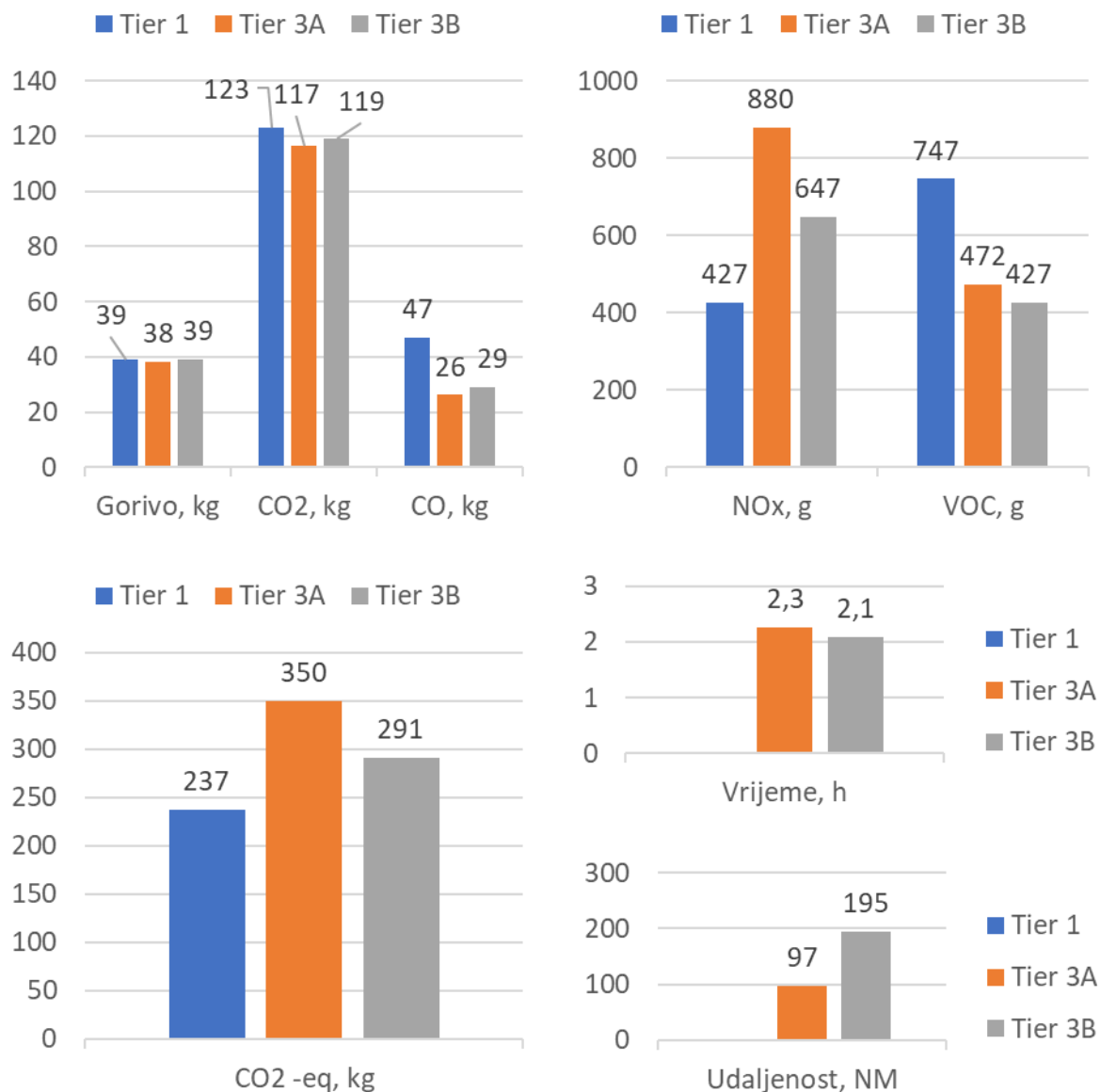


Slika 34. Ukupni rezultat Tier 1 modela za Let 1

### 8.2.4. Usporedba triju modela za Let 1

Radi jednostavnije usporedbe, rezultati svih triju metoda prikazuje se sljedećim zajedničkim dijagramima na slici 35.

Gorivo, a time i emisija ugljikova dioksida vrlo su slični za modele Tier 3A i Tier 3B. Emisije ugljikovog monoksida za 62 % su više kod primjene Tier 1 modela, odnosno za 10 % su manje kod Tier 3A modela u odnosu na Tier 3B model. Dakle oba unaprijeđena modela procjenjuju manje količine ugljikova monoksida za isti let. Razlog tomu moguće je u relativno visokim emisijskim faktorom u Tier 1 metodi. Valja napomenuti da je u izvoru naveden 95 postotni interval pouzdanosti s donjom granicom na 600, a gornjom na 2000 g<sub>CO</sub>/kg<sub>goriva</sub>. Dakle može se zaključiti da se primjenom Tier 1 emisijskog faktora dobivaju znatno više vrijednosti, jer ipak zrakoplov u krstarenju ispušta manje CO, što je pokazano ranije.



Slika 35. Usporedba rezultata Tier 1 modela za Let 1

Emisije dušikovih oksida za 106 % su veće kod primjene Tier 3A modela u odnosu na Tier 1. Kod Tier 3B modela, razlika je nešto manja, ali još uvijek značajna – 52 %. Suprotno smanjenju ugljikova monoksida u krstarenju, emisija NO<sub>x</sub> su krstarenju raste. Značajno povećanje NO<sub>x</sub> u krstarenju uzeto je u obzir kod oba unaprijeđena modela, no nije kod Tier 1 modela i to je razlog ovakvim odstupanjima.

Emisija hlapivih organskih spojeva najveća je kod Tier 1 modela, slično kao i ugljikovog monoksida. Veća je za 58 % u odnosu na Tier 3A model, a čak 75 % u odnosu na Tier 3B model.

Emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida izračunate su za CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Unaprjeđenim modelom rezultati se povećavaju za 47 % primjenom Tier 3A modela te oko 23 % za Tier 3 B model, u usporedbi s Tier 1 modelom izračuna. Uzrok tomu je relativno mala razlika u emisiji CO<sub>2</sub>, no emisije NO<sub>x</sub> znatno se razlikuju pa tako doprinose porastu CO<sub>2</sub> ekvivalenta.

Trajanje leta razlikuje se 9 % u usporedbi Tier 3A i Tier 3B modela. Izračunata udaljenost leta razlikuje se značajnije, Tier 3B modelom izračunata je dvostruka veća udaljenost nego li Tier 3A modelom. Pretpostavlja se da je izračun Tier 3B modelom znatno točniji jer se računa prema stvarnoj putanji, dok Tier 3A model računa udaljenost između aerodroma i ne uključuje eventualno letenje van te rute, što je upravo slučaj s ovim letom.

### 8.3. Let 2

Let 2 je let istog zrakoplova kao i u Letu 1. Zrakoplov ima karakteristike navedene u poglavlju 8.2.).

#### 8.3.1. Tier 3A model izračuna za Let 2

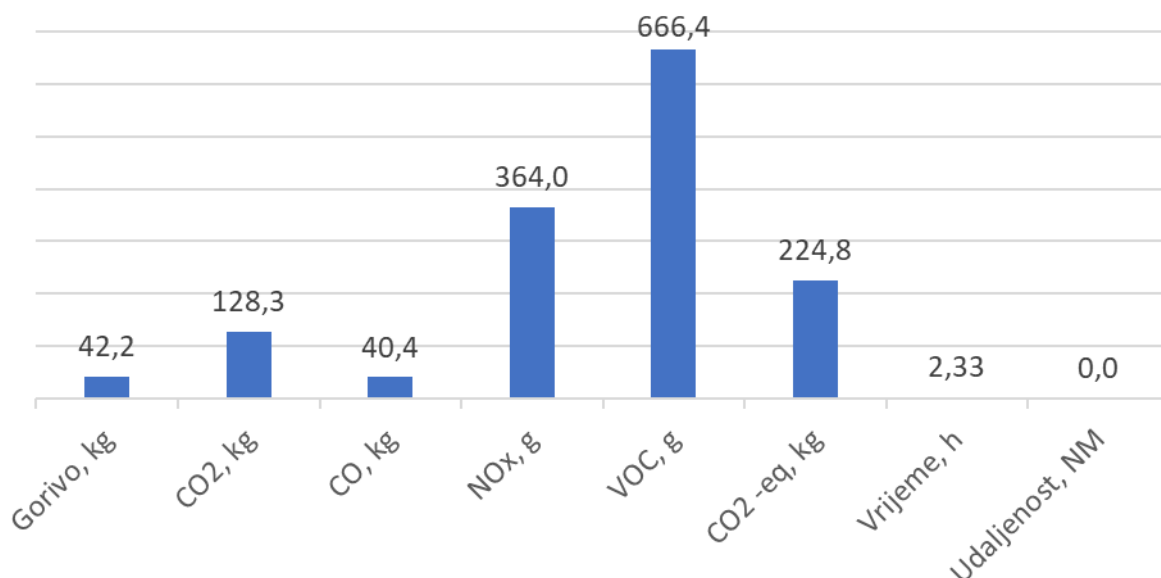
Ulazni podaci za Tier 3A model čine istih 8 vrsti podataka kao i u Letu 1. Ulazni podaci prikazani su tablicom 23.

Tablica 23. Ulazni podaci Leta 2 za Tier 3A model

Datum leta	30.10.2017.
Tip zrakoplova	C172
Registracija zrakoplova	9A DMG
ICAO oznaka aerodroma polijetanja	LDZL
ICAO oznaka aerodroma slijetanja	LDZL
Vrijeme početka leta	11:00
Vrijeme završetka leta	13:20
Broj ciklusa	5

Za jednostavniji usporedbu s drugim modelima, izrađen je dijagram na kojem su navedeni konačni podaci o procijeni potrošnje goriva, udaljenosti između aerodroma, trajanju leta te

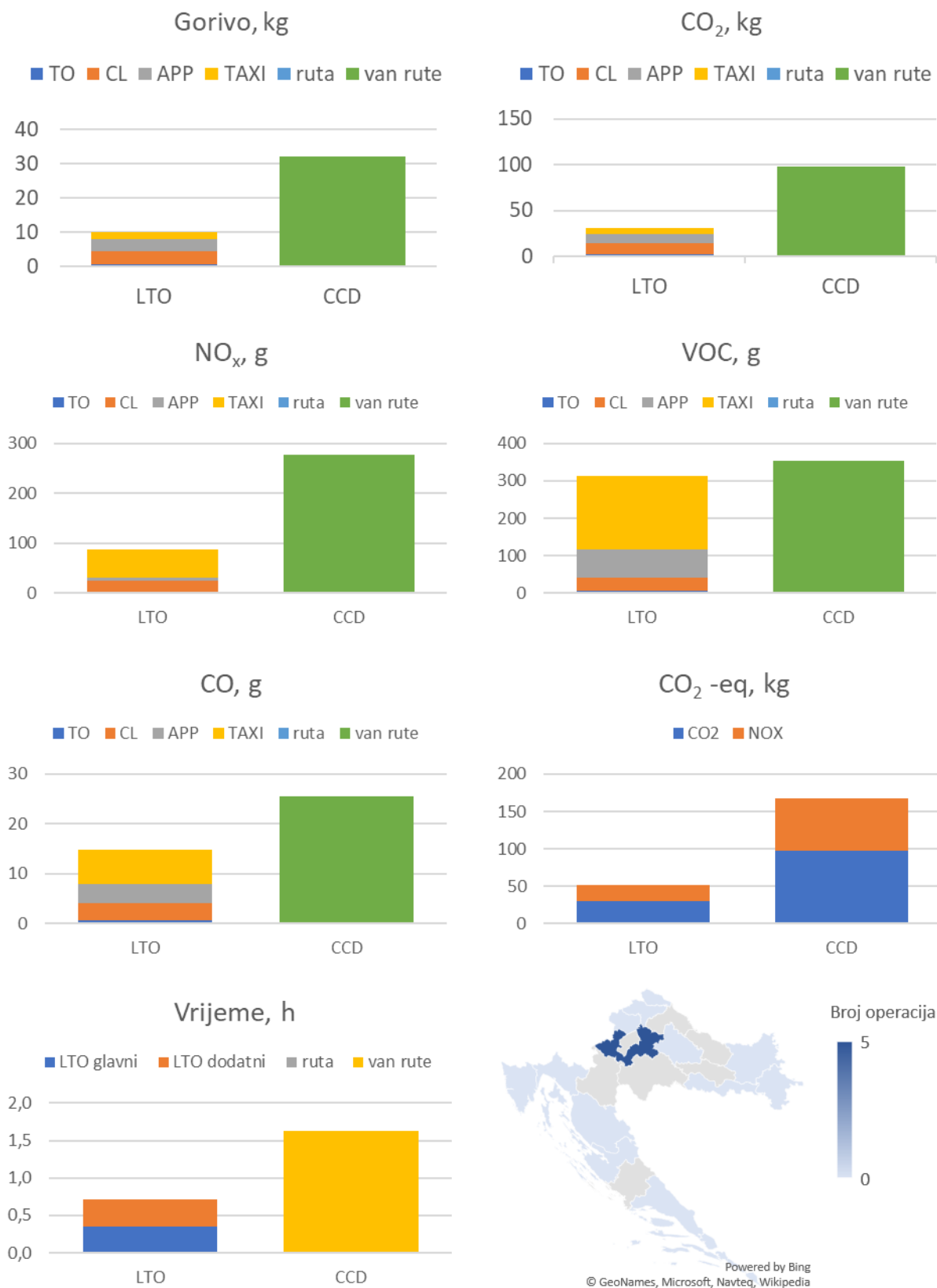
procijeni emisija ugljikova dioksida, ugljikova monoksida, dušikovih oksida, hlapivih organskih spojeva i izračuna emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida. Dijagram se nalazi na slici 36.



Slika 36. Ukupni rezultat Tier 3A modela za Let 2

Nakon unosa podataka i osvježavanja izračuna pomoću Pivot tablica i *Dashboarda* s prikazom podataka, izračunati su rezultati emisija na navedenom letu. Rezultati su grafički prikazani na slici 37., a u preuzeti su iz *Dashboarda* modela.

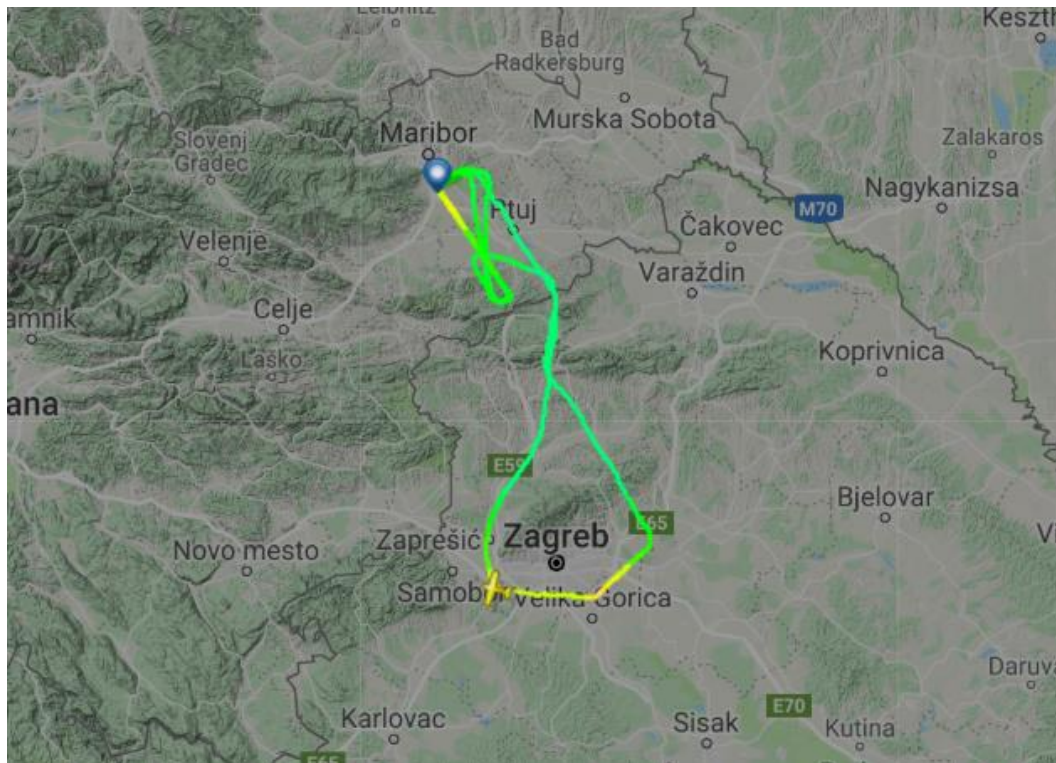




Slika 37. Prikaz rezultata Tier 3A modela za Let 2

### 8.3.2. Tier 3B model izračuna za Let 2

Podaci za Tier 3B model izračuna emisija na Letu 2 također su pronađeni na i preuzeti sa stranice *FlightRadar24*. Slika 38. prikazuje putanju zrakoplova preuzetog sa stranice.



*Slika 38. Putanja zrakoplova u Letu 2 prikazan na stranici FlightRadar24*

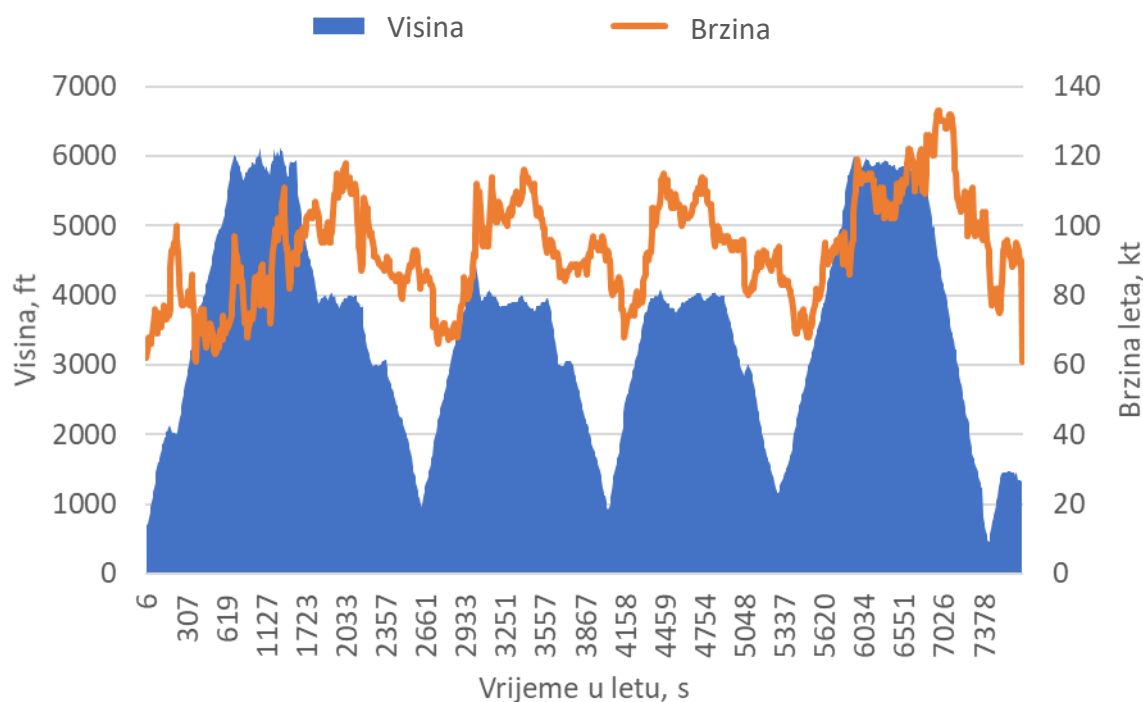
Promatranjem putanje leta može se uočiti da je zrakoplov poletio s Aerodroma Lučko i krenuo prema slovenskom Aerodromu Maribor. U okolici Maribora je izveo nekoliko zaokreta i slijetanja s produžavanjem na Aerodromu Maribor, nakon čega se uputio prema Zračnoj Luci Zagreb gdje je također izveo jedno slijetanje s produžavanjem. Nakon toga je krenuo prema Lučkom gdje je sletio i završio let.

Primjer od nekoliko točaka Leta 2 prikazuje tablica 24. Za podatke Leta 2, najmanja rezolucija očitavanja iznosi 6 s, maksimalna 115 s, a prosječna vrijednost iznosi 8,1 s.

Tablica 24. Dio ulazni podataka za Tier 3B model za Let 2

Timestamp	UTC	Callsign	Position	Position2	Altitude	Speed	Direction
1509363403	2017-10-30T11:36:43Z	9ADMG	46,325638	15,973853	5950	89	343
1509363452	2017-10-30T11:37:32Z	9ADMG	46,339462	15,951278	5550	97	289
1509363464	2017-10-30T11:37:44Z	9ADMG	46,34103	15,943909	5450	98	285
1509363476	2017-10-30T11:37:56Z	9ADMG	46,342472	15,93615	5350	94	284
1509363488	2017-10-30T11:38:08Z	9ADMG	46,343582	15,929104	5275	93	281
1509363500	2017-10-30T11:38:20Z	9ADMG	46,345081	15,921249	5150	97	287
1509363512	2017-10-30T11:38:32Z	9ADMG	46,346786	15,91383	5050	98	288
1509363524	2017-10-30T11:38:44Z	9ADMG	46,348713	15,906349	4950	99	290

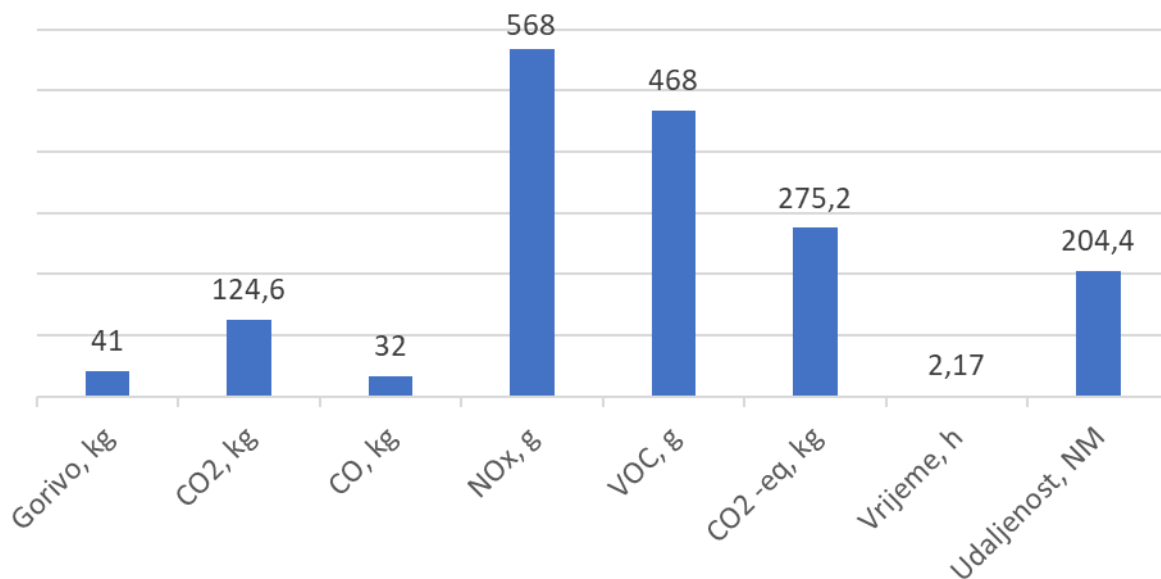
Dijagram visine leta i brzine u odnosu na tlo prikazuje slika 39.



Slika 39. Profil Leta 2 prema FlightRadar24 podacima

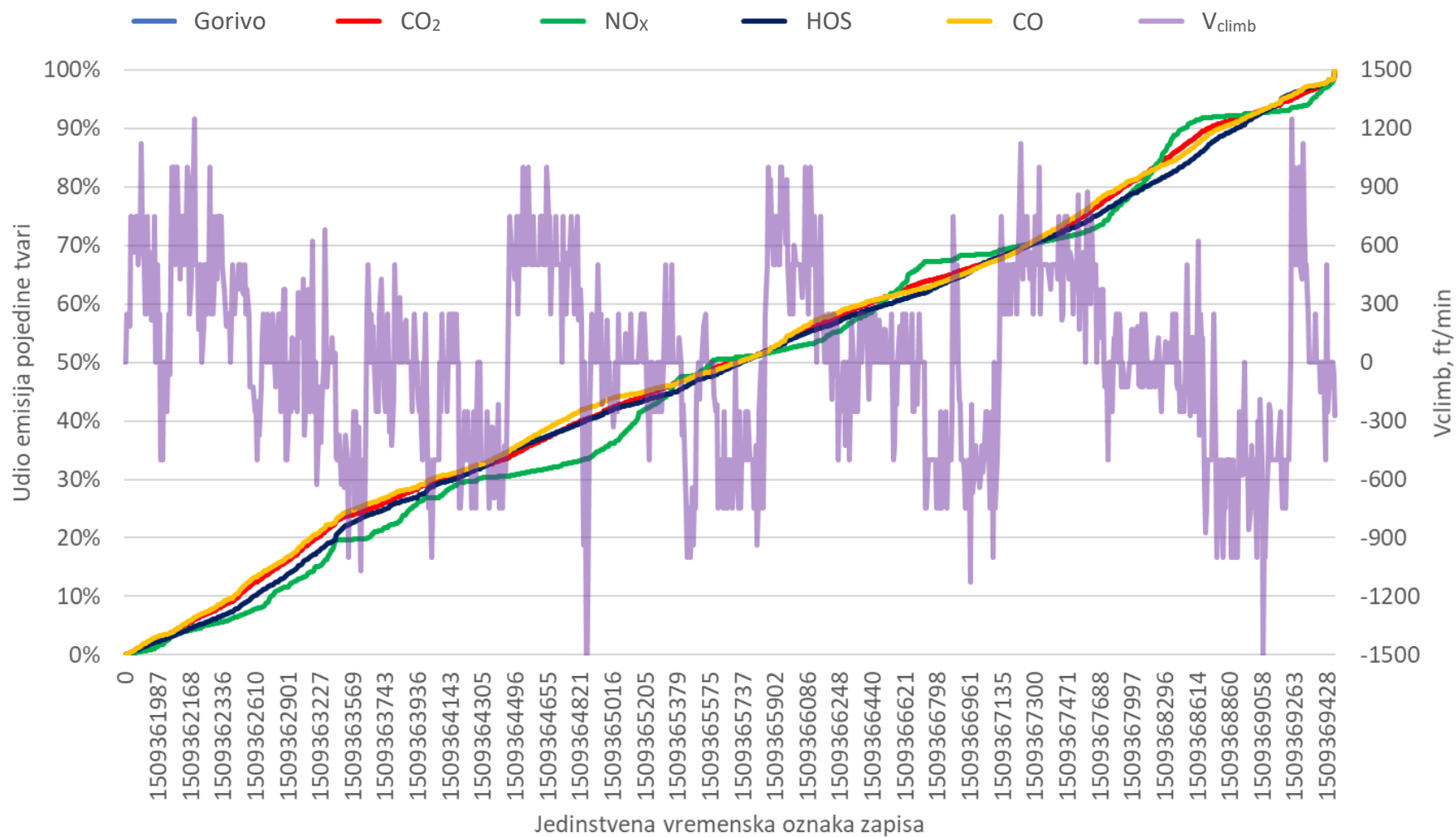
Iz profila leta jasno su uočljiva tri međuslijetanja u Mariboru te jedno u Zagrebu što s početnim polijetanjem i slijetanjem na kraju čini pet ostvarenih ciklusa. Nadalje, trajanje od otprilike 7800 s je oko 2,2 sata. Broj ciklusa i trajanje leta odgovara parametrima navedenim u prethodnom poglavlju, dakle može se zaključiti da se doista radi o istom letu.

Za usporedbu s drugim modelima izračuna, potrebni su ukupni iznosi emisija na ovom učitanoj letu, a prikazani su na slici 40.



Slika 40. Ukupni rezultat Tier 3B modela za Let 2

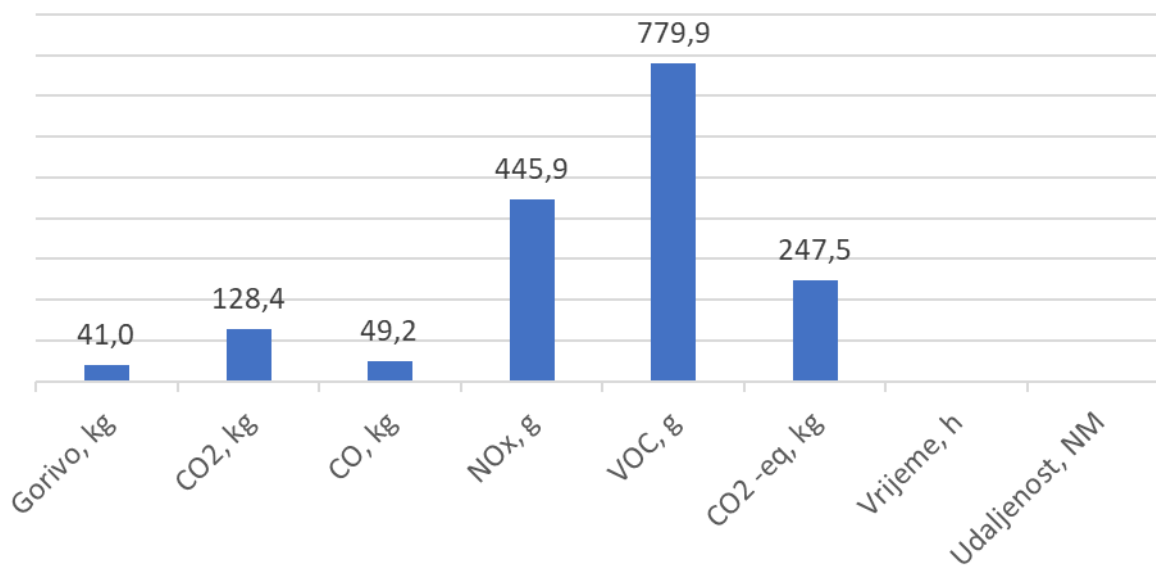
Za ovaj let također je moguće rezultate prikazati za svaku točku zapisa. Iz prikazanog dijagrama na slici 41. moguće je uočiti ovisnost emisija štetnih tvari o vertikalnoj brzini zrakoplova. Primjerice, zbog prilično dinamičnog leta, zrakoplov često mijenja režim leta pa se niti jedna faza ne ističe u odnosu na druge. Međutim, dušikovi oksidi ponovo pokazuju najveće oscilacije i variraju ispod i iznad emisija ostalih tvari.



Slika 41. Prikaz kumulativnih rezultata Tier 3B modela za Let 2

### 8.3.3. Tier 1 model izračuna za Let 2

Za Let 2, potrošnja goriva na letu iznosi 40 kilograma, prema Tier 3B modelu. Primjenom Tier 1 emisijskih faktora, izračunavaju se rezultati prikazani slikom 42. Na dijagramu nedostaju podaci o trajanju leta i udaljenosti, jer nisu potrebni za Tier 1 model izračuna pa ih nema među ulaznim podacima, a samim time, ne mogu se izračunati.

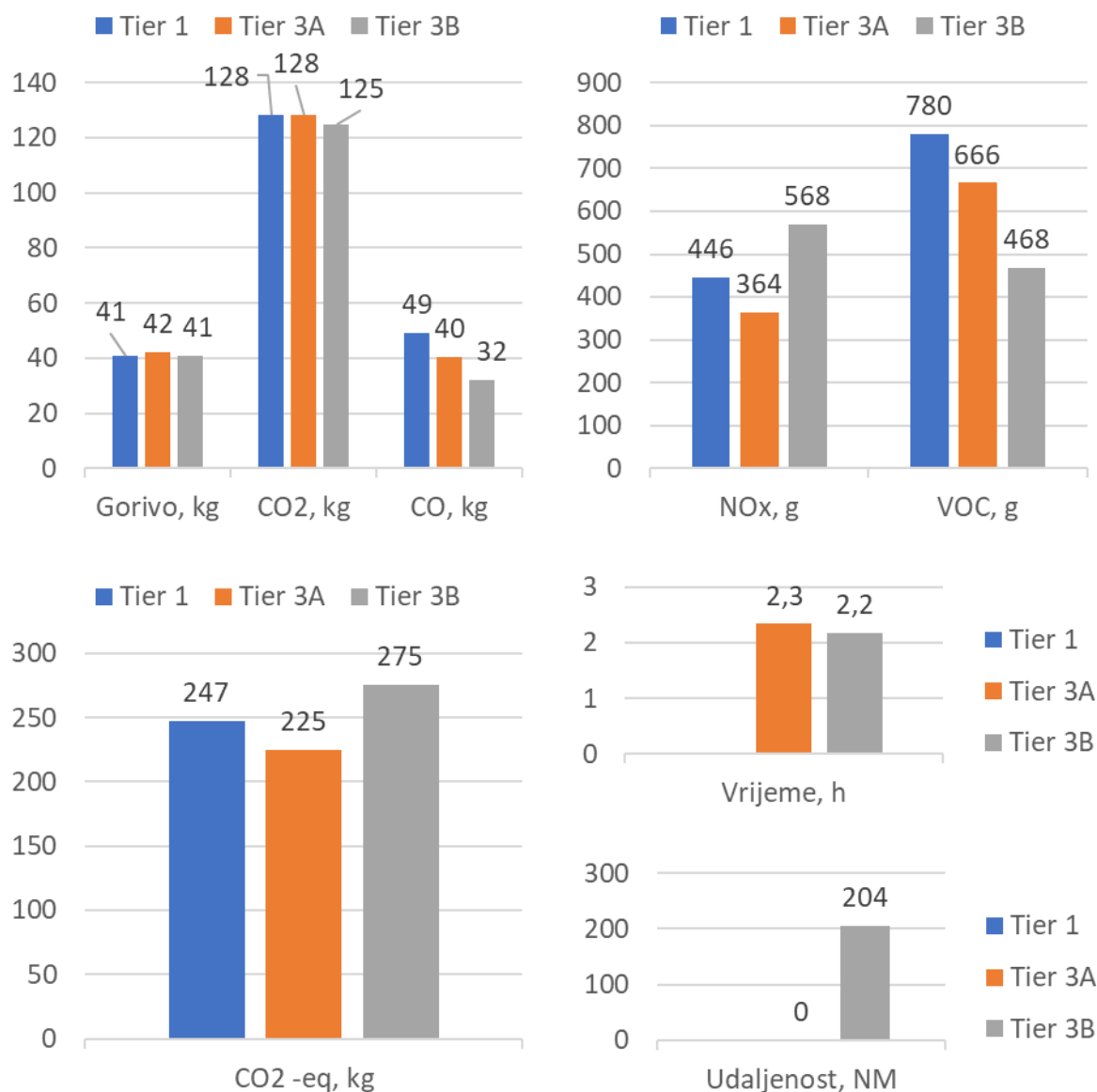


Slika 42. Ukupni rezultat Tier 1 modela za Let 2

### 8.3.4. Usporedba triju modela za Let 2

Radi jednostavnije usporedbe, rezultati svih triju metoda prikazuje se sljedećim zajedničkim dijagramima na slici 43.

Gorivo, a time i emisija ugljikova dioksida vrlo su slični za modele Tier 3A i Tier 3B. Emisije ugljikovog monoksida za 54 % su više kod primjene Tier 1 modela, odnosno za 25 % su više kod primjene Tier 3A modela u odnosu na Tier 3B model. Dakle oba unaprijeđena modela procjenjuju manje količine ugljikova monoksida u usporedbi s osnovnim Tier 1 modelom.



Slika 43. Usporedba rezultata za Let 2

Emisije dušikovih oksida su kod primjene Tier 3A modela za ovaj let znatno manje od Tier 1 i Tier 3B modela. Emisije dušikovih oksida su za 23 % veće kod Tier 1 modela, odnosno za 56 % veće kod primjene Tier 3B modela u odnosu na Tier 3A model. Pretpostavlja se da je razlog takvome odstupanju kod Tier 3A modela što nije uzet u obzir let na ruti osiromašenom smjesom. U zapisu iz Dnevnika letenja kao aerodrom početka i završetka leta naveden je Aerodrom Lučko. Međutim, zrakoplov je u stvarnosti prošao oko 378 km (204 NM) pri čemu je zasigurno barem jedan dio leta letio u režimu osiromašene smjese. Dakle, kada se polijeće i slijeće s istog aerodroma, postoji mogućnost odstupanja u izračunu Tier 3A modelom. Iako se u izračunu ne uzima u obzir duljina leta, trajanje je uračunatu u cijelom iznosu.

Emisije hlapivih organskih spojeva najveće su kod Tier 1 modela, slično kao i ugljikovog monoksida. Veće su za 17 % u odnosu na Tier 3A model, a čak 67 % u odnosu na Tier 3B model.

Emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida izračunate su za CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Rezultati su u skladu s razlikama u emisiji dušikovih oksida. Unaprjeđenim modelom Tier 3A izračunate su najmanje emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida, a model Tier 3B, emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida su najveće.

#### 8.4. Let 3

Let 3 je let zrakoplova tipa *Diamond DA 42 Twin Star*, registracije OE-FYZ. U zrakoplov su ugrađena dva Dieselova klipna motora Thielert TAE 125 od 99 kW (133 KS), a koristi gorivo Jet A-1. Tipična brzina krstarenja zrakoplova je oko 88 m/s (172 čvora). Ovaj zrakoplov zanimljiv je za analizu upravo zbog korištenja Dieselovih motora, ali i zbog toga jer je dvomotorni. Navedeni podaci koristit će se za sve modele izračuna za Let 3.

##### 8.4.1. Tier 3A model izračuna za Let 3

Ulazni podaci za Tier 3A model čine istih 8 vrsti podataka kao i u Letu 1 i Letu 2. Ulazni podaci prikazani su tablicom 25.

Tablica 25. Ulazni podaci Leta 3 za Tier 3A model

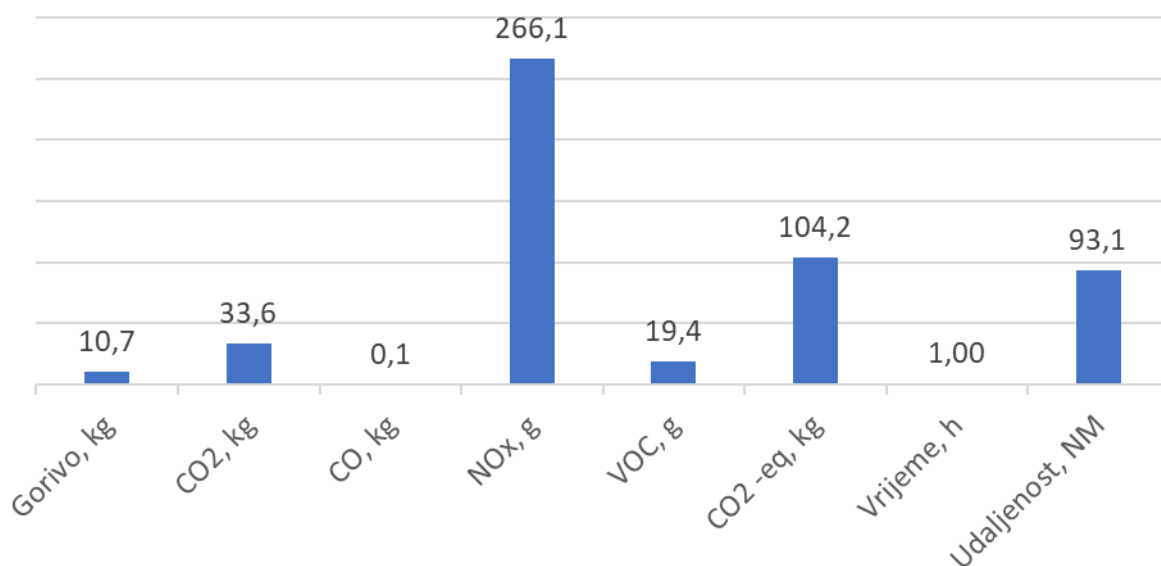
Datum leta	06.12.2017.
Tip zrakoplova	DA42
Registracija zrakoplova	OE FYZ
ICAO oznaka aerodroma polijetanja	LOAN
ICAO oznaka aerodroma slijetanja	LDVA
Vrijeme početka leta	13:30
Vrijeme završetka leta	14:30
Broj ciklusa	1

Ovaj let odabran je prvenstveno zbog malo dostupnih letova na stranici *FlightRadar24* koja ne bilježi velik broj GA letova. Iako je zrakoplov na ovom letu letio iz austrijskog Wiener



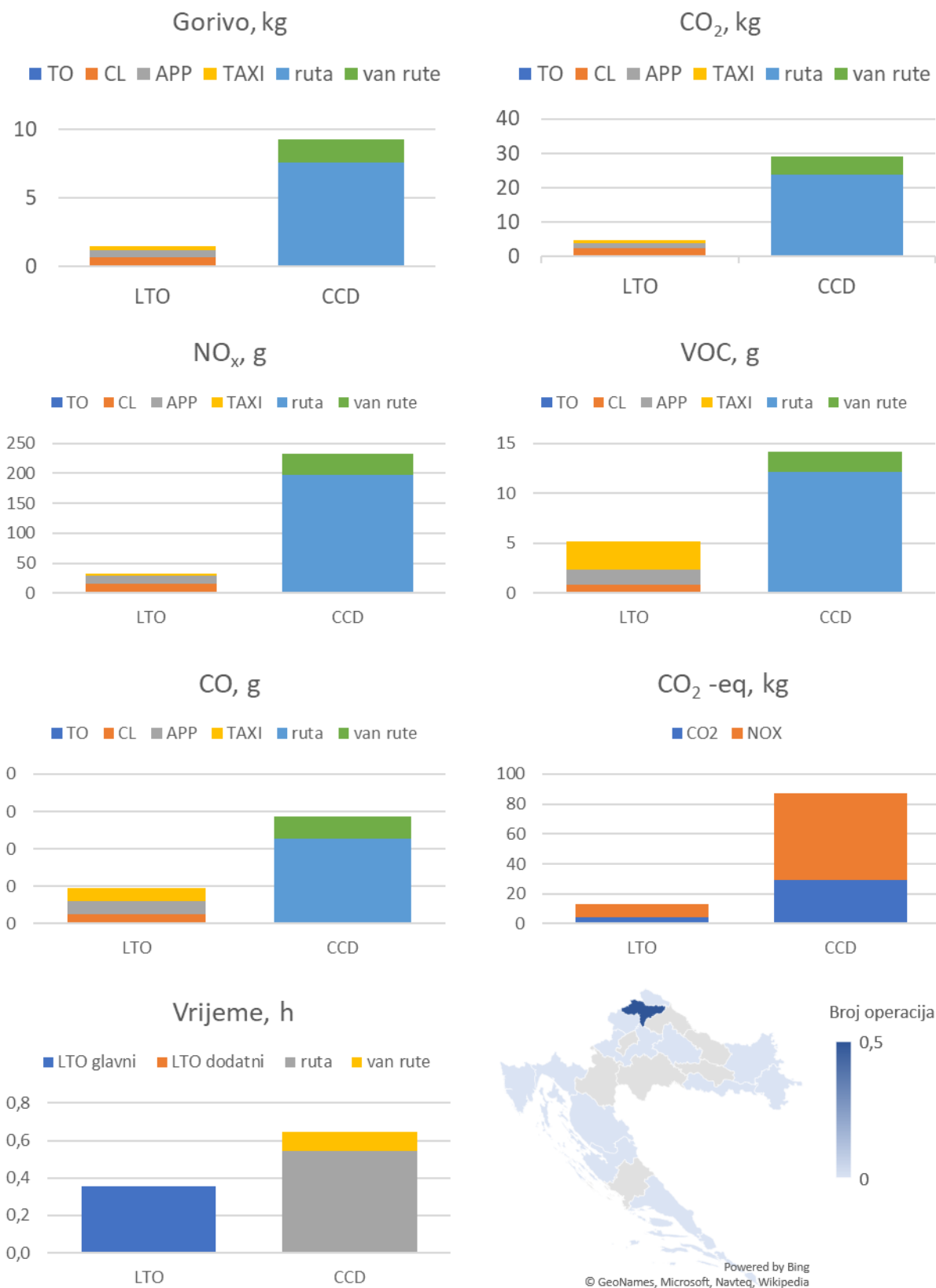
Neustadta prema Varaždinu pa ne pripada domaćem prometu, za potrebe analize i usporedbe poslužit će kao izvrstan primjer. Zbog aerodroma polijetanja van Republike Hrvatske, prvo je bilo potrebno proširiti matricu udaljenosti aerodroma za još jedan aerodrom – Aerodrom Wiener Neustadt, ICAO oznake LOAN.

Za jednostavniju usporedbu s drugim modelima, izrađen je dijagram na kojem su navedeni konačni podaci o procijeni potrošnje goriva, udaljenosti između aerodroma, trajanju leta te procijeni emisija ugljikova dioksida, ugljikova monoksida, dušikovih oksida, hlapivih organskih spojeva i izračuna emisije ekvivalentnog ugljikovog dioksida. Dijagram se nalazi na slici 44.



Slika 44. Ukupni rezultat Tier 3A modela za Let 3

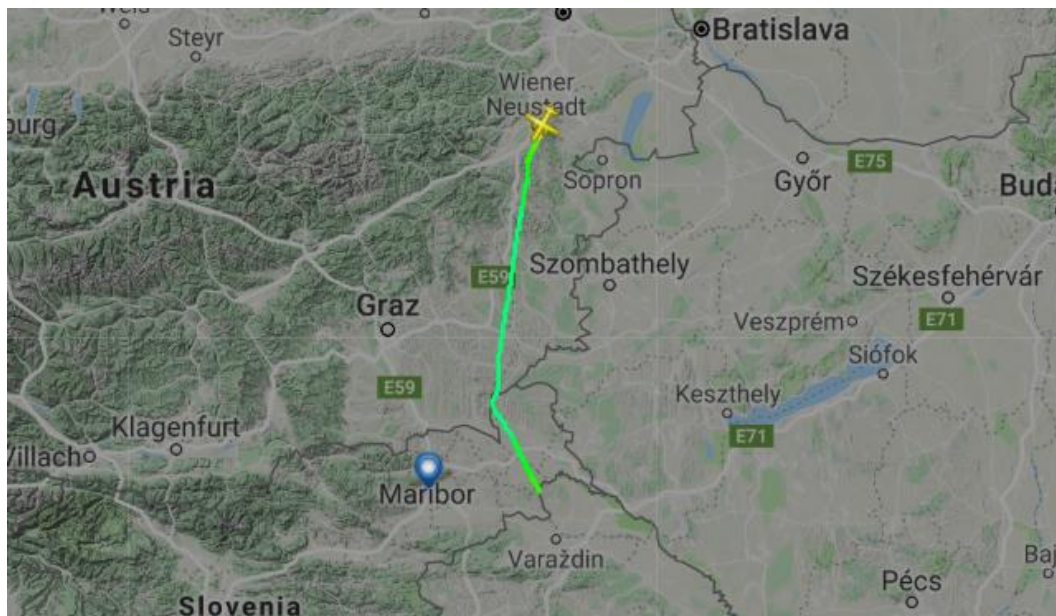
Nakon unosa podataka i osvježavanja izračuna pomoću Pivot tablica i *Dashboarda* s prikazom podataka, izračunati su rezultati emisija na navedenom letu. Rezultati su grafički prikazani na slici 45., a u preuzeti su iz *Dashboarda* modela.



Slika 45. Prikaz rezultata Tier 3A modela za Let 3

#### 8.4.2. Tier 3B model izračuna za Let 3

Za Tier 3B model izračuna potrebno je imati informacije i podatke o čitavoj putanji leta. U tu svrhu, podaci za ovaj let su pronađeni na i preuzeti sa stranice *FlightRadar24*. Slika 46. prikazuje putanju zrakoplova preuzetog sa stranice.



Slika 46. Putanja zrakoplova u Letu 3 prikazana na stranici *FlightRadar24*

Promatranjem putanje leta može se uočiti da je zrakoplov poletio iz Wiener Neustadta te u pretežno pravocrtnom letu nastavio prema Sloveniji i dalje prema Hrvatskoj. Može se primjetiti i problem pokrivenosti i primanja podataka od zrakoplova. Usprkos tome, zbog ograničenog uzorka let je uzet u obzir, a ujedno pokazuje i moguće probleme ovog modela u stvarnoj primjeni. Negdje u blizini hrvatsko-slovenske granice završava zapis o letu, jer se prijem signala od zrakoplova smanjuje na manjim visinama leta i područjima slabije pokrivenosti prijemnicima na zemlji.

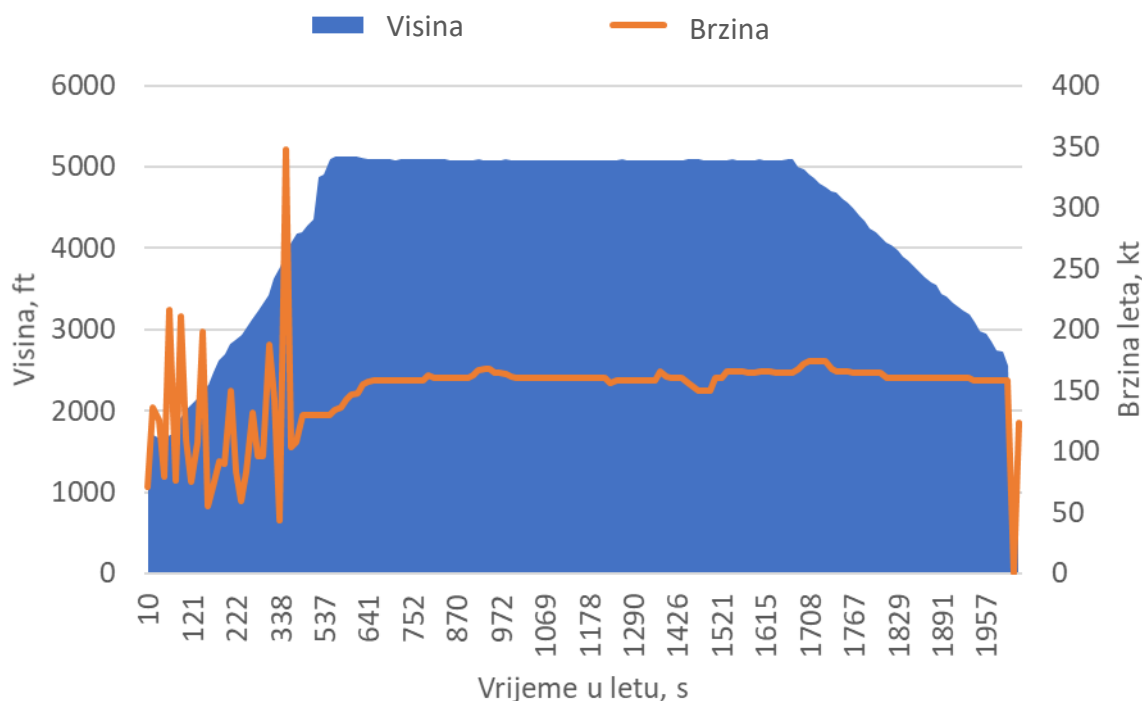
Primjer od nekoliko točaka Leta 3 prikazuje tablica 26 Za podatke Leta 3, najmanja rezolucija očitavanja iznosi 6 s, maksimalna 82 s, a prosječna vrijednost iznosi 12,8 s.

Tablica 26. Dio ulaznih podataka za Tier 3B model za Let 3

Timestamp	UTC	Callsign	Position	Position2	Altitude	Speed	Direction
1512568727	2017-12-06T13:58:47Z	OEFYZ	47,23344	16,091242	5097	167	188
1512568739	2017-12-06T13:58:59Z	OEFYZ	47,224442	16,089361	5078	168	188
1512568751	2017-12-06T13:59:11Z	OEFYZ	47,215439	16,087366	5075	168	188
1512568763	2017-12-06T13:59:23Z	OEFYZ	47,206394	16,085173	5074	164	189
1512568775	2017-12-06T13:59:35Z	OEFYZ	47,197392	16,082897	5075	165	189
1512568787	2017-12-06T13:59:47Z	OEFYZ	47,188148	16,08053	5095	163	189
1512568798	2017-12-06T13:59:58Z	OEFYZ	47,182491	16,078964	5075	161	190
1512568810	2017-12-06T14:00:10Z	OEFYZ	47,169754	16,07548	5074	160	190

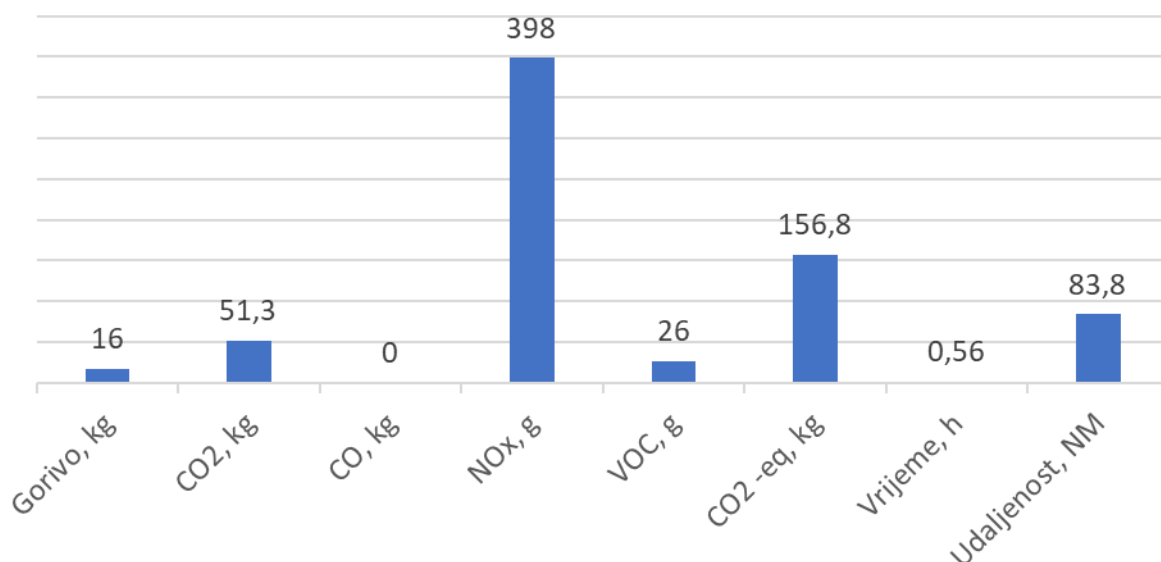
Dijagram visine leta i brzine u odnosu na tlo prikazuje slika 47.

Nagli porast visine leta na početku leta i nagli pad visine na kraju leta uzrokovan je spomenutim problemom pokrivenosti prijamnicima na tlu. Iz dijagrama se može očitati da je granica prijema kod polijetnaja na oko 550 m (1800 stopa), a kod prilaza na oko 760 m (2500 stopa) nadmorske visine. Prema profilu leta zaključuje se da se radi o tipičnom letu na ruti, uglavnom stalne brzine i samo s jednim ciklusom sliejtanja i polijetnaja. Vrijeme trajanja leta od oko 2000 s je preračunato u minute je oko 33 minute.



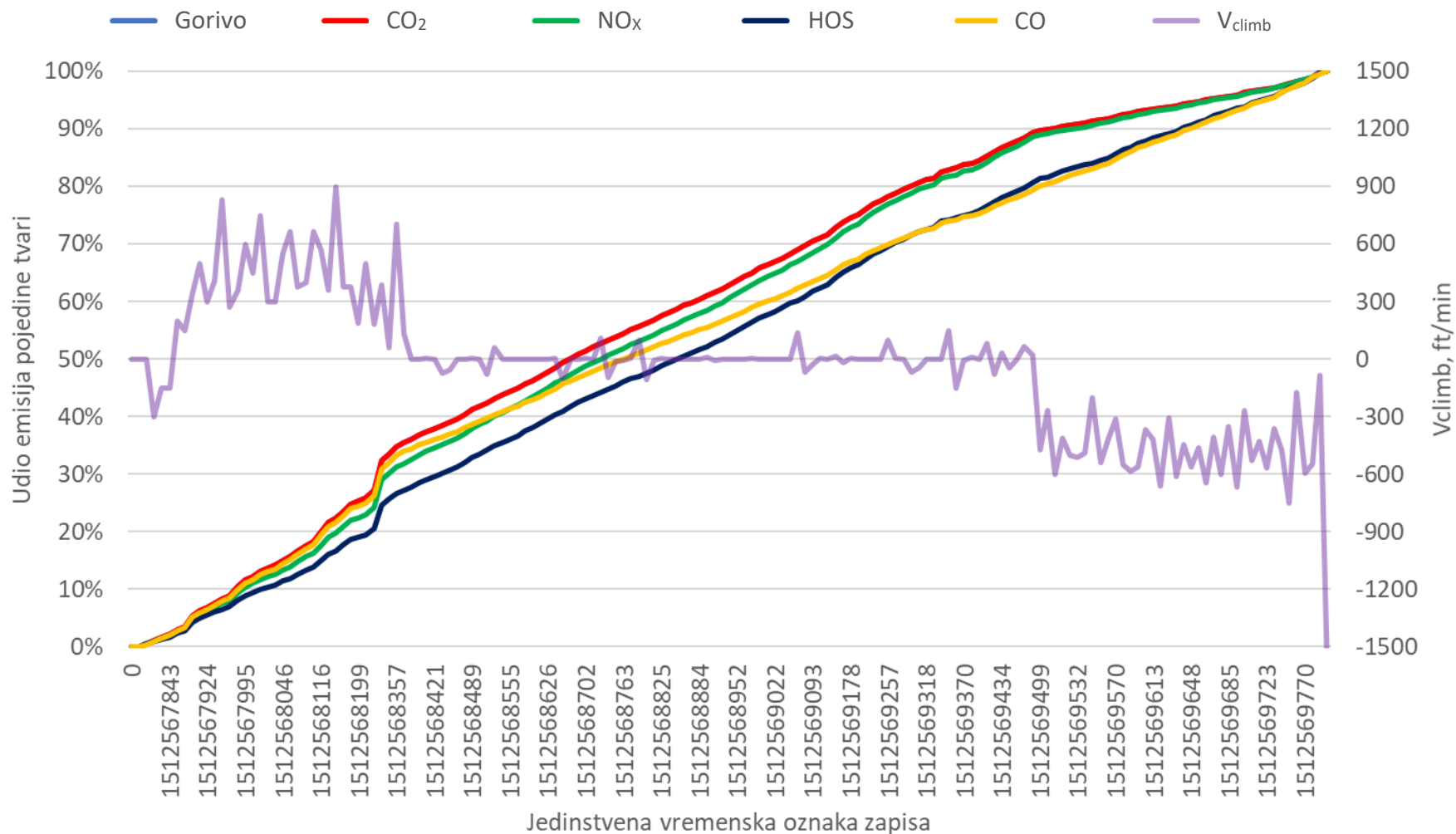
Slika 47. Profil Leta 3 prema FlightRadar24 podacima

Za usporedbu s drugim modelima izračuna, potrebni su ukupni iznosi emisija na ovom učitanoj letu, a prikazani su na slici 48.



Slika 48. Ukupni rezultat Tier 3B modela za Let 3

Budući da se ovim modelom emisije procjenjuju prema putanji leta, rezultate je moguće prikazati za svaku točku zapisa. Tako se mogu analizirati emisije štetnih tvari i trendovi promjena tijekom cijelog leta. Slika 49. prikazuje rezultat dobiven Tier 3B modelom. Ljubičastom linijom prikazana je vertikalna brzina zrakoplova. Vertikalna brzina računa se dijeljenjem razlike visina dvaju uzastopnih zapisa s razlikom jedinstvenog vremenskog zapisa, prema formuli (14). Iz prikazanog dijagrama moguće je uočiti ovisnost emisija štetnih tvari o vertikalnoj brzini zrakoplova. Primjerice, može se primijetiti da zbog relativno stalnih uvjeta leta, emisije štetnih tvari gotovo linearno rastu prema svojim konačnim vrijednostima bez izraženih fluktuacija.

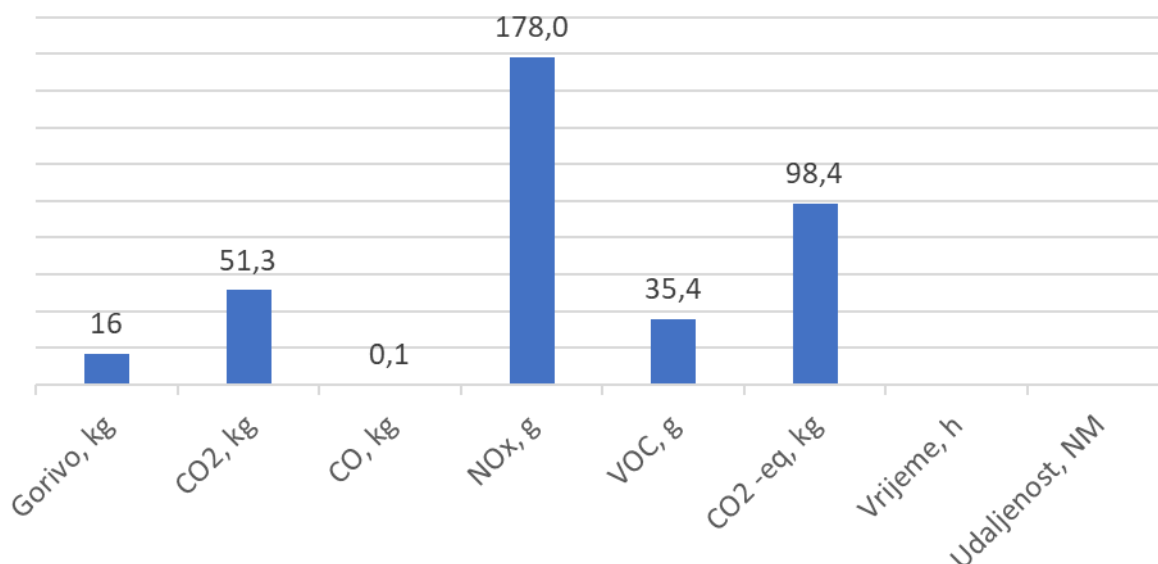


Slika 49. Prikaz rezultata Tier 3B modela za Let 3

### 8.4.3. Tier 1 model izračuna za Let 3

Za Let 3, potrošnja goriva na letu iznosi 16 kilograma, prema Tier 3B modelu. Primjenom Tier 1 emisijskih faktora, izračunavaju se rezultati prikazani slikom 50.

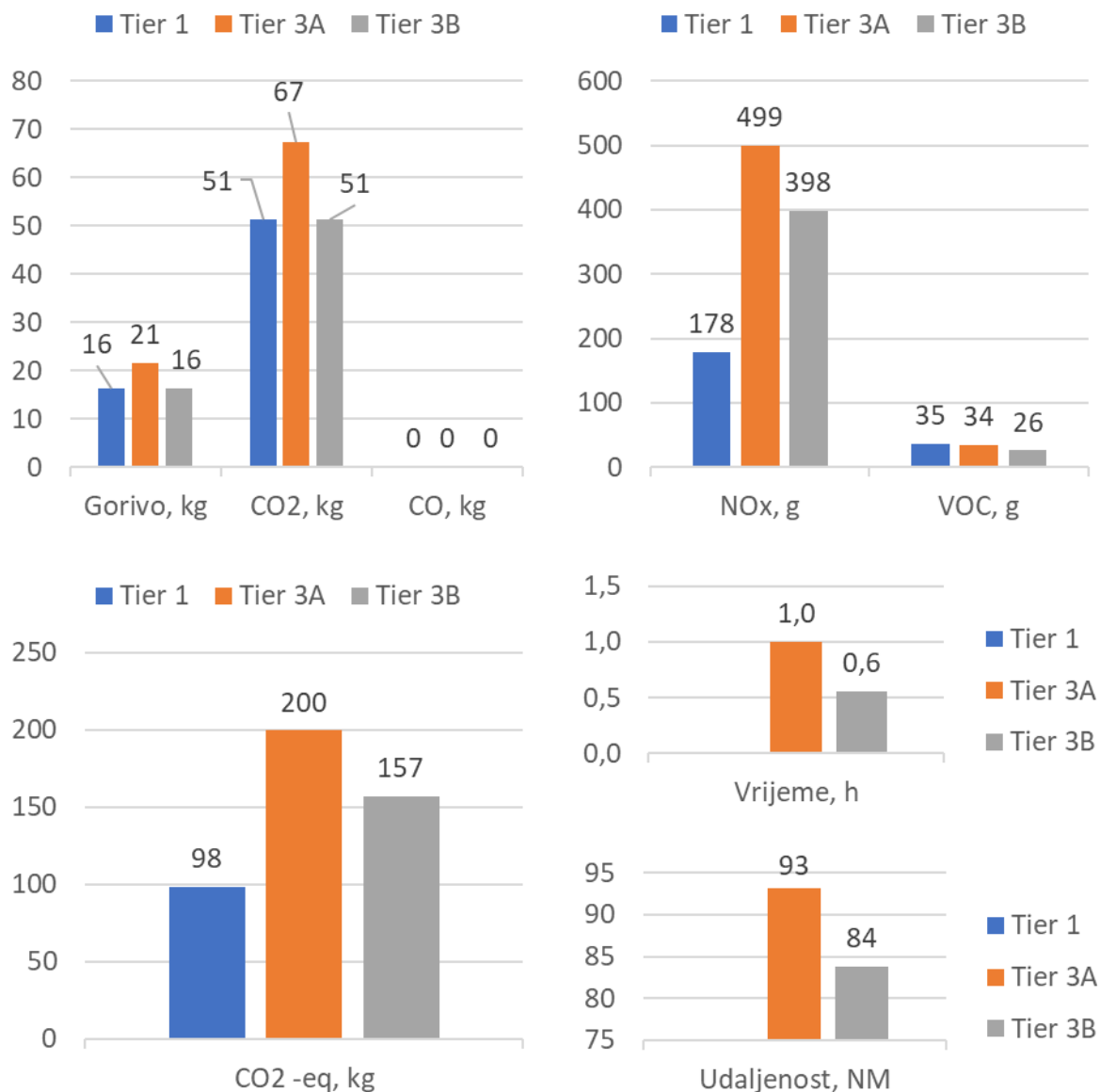
Kao što je objašnjeno u poglavlju 6.2.3., emisijski faktori Tier 1 modela ovise o vrsti goriva. U Letu 3 korišten je zrakoplov s Dieslovim klipnim motorima koji kod primjene u zrakoplovima koriste kerozin namijenjen mlaznim motorima, oznake Jet A-1. U usporedbi s emisijskim faktorima za aviobenzin, emisijski faktori za Jet A-1 gorivo značajno su manji za ugljikov monoksid, manji su i za hlapive ogranske spojeve, dok su za ugljikov dioksid i dušikove okside sličnih vrijednosti kao i za aviobenzin.



Slika 50. Ukupni rezultat Tier 1 modela za Let 3

### 8.4.4. Usporedba triju modela za Let 3

Radi jednostavnije usporedbe, rezultati svih triju metoda prikazuje se sljedećim zajedničkim dijagramima na slici 51.



Slika 51. Usporedba rezultata za Let 3

Iznos potrošenog goriva kod izračuna Tier 3B modelom je za 24 % manji od iznosa dobivenog Tier 3A modelom. Ta razlika se može korelirati i s vremenom trajanja leta koje je kod Tier 3B modela manje za oko 45 % zbog ranije objašnjenog problema prijama signala na malim visinama. Prijeđena udaljenost je također manja za oko 10 % kod Tier 3B modela iz istih razloga. Zbog toga su i rezultati emisija općenito dodatno smanjeni kod izračuna tim modelom, što treba uzeti u obzir kod analize.

Emisije ugljikova monoksida jednake su nuli jer takvi motori gotovo nikad ne rade s bogatom smjesom pa stoga ne dolazi do nepotpunog izgaranja i emisija ugljikovog monoksida. Emisije hlapivih organskih spojeva isto su tako niske u usporedbi s Letovima 2 i 3, no također postoje



odstupanja između modela. Primjerice, iznos emisija izračunat Tier 3B modelom za 28 % je manji u odnosu na rezultat Tier 1 modela.

Iznosi emisija dušikovih oksida izračunate primjenom unaprijeđenih modela veći su čak 2 do gotovo 3 puta u usporedbi s Tier 1 modelom. Takve razlike nisu zanemarena, a jasan je i njihovo utjecaj na iznose ekvivalentnog ugljikovog dioksida koji su veći za 50 % do 150 % od iznosa dobivenih Tier 1 modelom.

Tako velike razlike posljedica su većinskog udjela leta na ruti promatranog zrakoplova. Zbog precizne regulacije faktora zraka, emisije ugljikova monoksida vrlo su niske, no negativna posljedica je upravo znatno povećanje emisija dušikovih oksida (opširnije u poglavlju 6.3.).

## 8.5. Rasprava

Do sada su za svaki let uspoređeni dobiveni rezultati primijenjenih modela. Let 1, 2 i 3 znatno se razlikuju po vrsti, broju ostvarenih ciklusa, trajanju i duljini, ali i prema zrakoplovu, motoru i broju motora te prema gorivu. Može se pretpostaviti da se time može osim usporedbe modela, kvalitetno napraviti i usporedba prema spomenutim parametrima leta.

Iz takvog šireg promatranja rezultata, primjećuje se da količina goriva uglavnom odgovara s razlikom između modela od  $\pm 1$  kg goriva po letu, odnosno oko  $\pm 2$  % goriva, osim u Letu 3 gdje je razlika veća, no to je pripisano nepotpunim podacima sa stranice *FlightRadar24* koji se koriste za izračun modelom Tier 3B.

Iznosi emisija ugljikova dioksida linearno ovise o količini potrošenog goriva, tako da ne pokazuju značajna odstupanja među modelima ni različitim zrakoplovnim motorima i korištenom gorivu.

Emisije ugljikovog monoksida značajno ovise o vrsti motora, a variraju i s promjenom režima rada motora. Iznosi emisija ugljikovog monoksida u Letu 3 s Dieselovim motorom gotovo su zanemarive, što se smatra bitnom prednošću takvih motora zbog zaštite okoliša, ali i sigurnosti pilota i putnika u zrakoplovu. Kod Ottovih motora, emisije ugljikova monoksida su vrlo velike u usporedbi s Dieselovim motorima. Među korištenim modelima također dolazi do razlika, pri čemu rezultati analize pokazuju da se modelom Tier 1 izračuna dobivaju vrijednosti i do 62 % veće od iznosa dobivenih Tier 3B modelom. Tako velika odstupanja je potrebno dodatno provjeriti istraživanjima i mjerenjima te prema tome ažurirati emisijske faktore Tier 1 modela kako ne bi došlo do precjenjivanja vrijednosti emisija ugljikovog monoksida.

Iznosi emisija hlapivih organskih spojeva razlikuju se od modela do modela slično kao i emisije ugljikova monoksida. Tier 1 model na promatranom uzorku pokazuje veće iznose od Tier 3A i Tier 3B modela. Za detaljnije analize tih tvari prvenstveno je potrebno utvrditi njihov točni sastav zbog njihova različitog djelovanja na okoliš.

Dušikovi oksidi zbog svojeg stakleničkog potencijala (poglavlje 2.4.) doprinose negativnom efektu staklenika, a ovisno o količini, mogu doprinositi i više od ugljikova dioksida. Kod režima rada osiromašenom smjesom emisije dušikovih oksida značajno rastu u odnosu na druge režime rada. To je vidljivo kod Letova 1 i 3 u kojima se u većoj mjeri koristi režim rada motora osiromašenom smjesom, tj. leti se na ruti stalnom brzinom i na stalnoj visini leta. Oba unaprijeđena modela izračuna procjenjuju 2 do gotovo 3 puta veće emisije dušikovih oksida u tim letovima. Kod Leta 2 koji je znatno dinamičniji i s manje vremena provedenog u letu na ruti, odstupanja su manja. Pri tome se korištenjem modela Tier 3A dobivaju nešto manji iznosi, a korištenjem modela Tier 3B nešto veći iznosi od Tier 1 modela.

Tako veliki iznosi emisija dušikovih oksida povećavaju iznos ekvivalentnog ugljikovog dioksida na Letovima 1 i 3 od 50 do 100 % uspoređujući Tier 3B model i Tier 1 model izračuna. Pojednostavljeno rečeno, utjecaj emisija štetnih tvari iz takvih letova podcijenjen je trenutno korištenim načinima izračuna. Emisije štetnih tvari iz zrakoplova koji lete u režimu rada motora s osiromašenom smjesom u stvarnosti doprinose efektu staklenika više no što se do sada pretpostavljalo.

Usporedbom trajanja leta kod modela Tier 3A i Tier 3B, uočeno je da podudaranje prvenstveno ovisi o kvaliteti zapisa putanje zrakoplova. Kod potpunih zapisa kao što su Let 1 i 2, vrijeme se razlikuje do samo 9 % za što se pretpostavlja da pripada početnim i krajnjim dijelovima leta kod kojih je slabo širenje digitalnih signala do prijamnika. Pretpostavlja se da se u tim dijelovima leta odvija voženje zrakoplova po tlu, dakle računanje emisija iz te faze ne može se izvesti Tier 3B modelom jer rijetko postoje tako kompletni zapisi. Zbog toga bi rezultatima Tier 3B modela trebalo dodati emisije iz voženja dobivenih Tier 1 modelom, što bi u jednom dijelu povećalo emisije ugljikova monoksida u fazi voženja.

Određivanje prijedene udaljenosti na letu značajno ovisi o korištenom modelu. Korištenjem Tier 1 modela ne računaju se udaljenost ni vrijeme u letu. Određeno unaprijeđenje predstavlja model Tier 3A koji procjenjuje prijedenu udaljenost na temelju udaljenosti među aerodromima, no problem se javlja kad su polazni i odredišni aerodrom jednaki pa je udaljenost

jednaka nuli. U tom slučaju, emisije se modelom Tier 3A računaju isključivo prema trajanju leta. To je i dalje znatno bolje od Tier 1 modela, no potrebno je na većoj količini podataka utvrditi utjecaj na rezultate. Kod Tier 3B modela, prijedena udaljenost vrlo je točna, a prikladnom rezolucijom očitavanja i kompletnim zapisom leta, moguće je vrlo precizno odrediti prijedenu udaljenost. Uzimajući u obzir točnost prijedene udaljenosti i utvrđivanje režima rada motora prema vertikalnoj brzini zrakoplova te uz pretpostavku točnih emisijskih faktora, ovaj najkompleksniji model izračuna emisija smatra se najtočnijim. Osim toga, radom je pokazano da se može primijeniti za brzi izračun emisija po letu i za zrakoplove generalne avijacije.

Iz svega navedenog, zaključuje se da je daljnje unaprjeđenje ovih modela moguće kroz:

- a) korištenje emisijskih faktora utvrđenih na većem uzorku zrakoplova ispitivanjima u stvarnim uvjetima (u letu),
- b) proširenjem baze podataka aerodroma na aerodrome izvan RH,
- c) poboljšanje ulaznih podataka za Tier 3B model, tako da zapis o letu uključuje sve faze od pokretanja motora na početku do gašenja motora na kraju leta te povećanjem broja praćenih parametara,
- d) aproksimiranje izračunati vertikalnih brzina krivuljama višeg reda za svrhom ujednačavanja prijelaza iz jednog u drugi režim,
- e) te reprogramiranje modela u složenijem programskom okruženju s jasnim korisničkim sučeljem i mogućnošću komercijalizacije ovih alata.

## 9. ZAKLJUČAK

Emisije štetnih tvari iz izvora s manjim udjelom u ukupnim antropogenim emisijama prate se osnovnim modelima i ta područja su bitno slabije razvijena i istražena. Jedno od tih područja čine zrakoplovi generalne avijacije. Zbog toga su u ovom radu istražene mogućnosti unapređenja modela procijene emisija s ciljem povećanja točnosti izračuna emisija za potrebe izrade inventara emisija.

Analizom postojećih metoda te dostupnih podataka, uočena je mogućnost unaprjeđenja s osnovne razine Tier 1 na najnaprednije razine Tier 3A i Tier 3B. Za svaki od modela izrađena je *Excel* baza podataka kojom je moguće brzo izračunati emisije štetnih tvari iz velikog broja izvora. Modeli su primijenjeni na nekoliko letova kojima je ustanovljena razlika u rezultatima tih modela u usporedbi s osnovnim Tier 1 modelom.

Rezultati pokazuju slične vrijednosti utrošenog goriva na letu te s tim povezanih emisija ugljikova dioksida. Primjenom unaprijeđenih modela procijene, iznosi emisija ugljikovog monoksida i hlapivih organskih spojeva su manje, ali iznosi emisija dušikovih oksida veći su i nekoliko puta. Uzrok tomu je značajan porast emisija dušikovih oksida u režimu rada osiromašenom smjesom, koji se Tier 1 modelom pravilno ne uključuje u izračun. Kod unaprijeđenih modela, režim rada osiromašenom smjesom utvrđen je analizom prijedene udaljenosti na letu i udjelu faze krstarenja u letu. Doprinos porasta dušikovih oksida efektu staklenika evaluiran je izračunom ekvivalentnog iznosa ugljikova dioksida.

Na kraju rada navedene su mogućnosti i smjernice za daljnji razvoj ovih modela.

## 10. LITERATURA

- [1] Y. Huang et al., »Global organic carbon emissions from primary sources from 1960 to 2009,« *Atmospheric Environment*, br. 122, pp. 505-512, 2015.
- [2] A. Skuce, »The history of emissions and the Great Acceleration,« *Critical Angle*. Dostupno na: <https://critical-angle.net/2015/04/01/emissions-history-and-the-great-acceleration/>. [23. studenog 2018.]
- [3] U.S. EPA, »Evolution of the Clean Air Act,« U.S. Environmental Protection Agency. Dostupno na: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/evolution-clean-air-act>. [15. rujna 2018.]
- [4] G. Kittredge, »Environmental Protection Agency Aircraft Emissions Standards,« u *Aircraft Engine Emissions*, Cleveland, 1977.
- [5] European Environment Agency, »EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: Technical guidance to prepare national emission inventories,« Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016.
- [6] C. Portier i et al., »A Human Health Perspective On Climate Change,« Research Triangle Park, NC:Environmental Health Perspectives/National Institute of Environmental Health Sciences, 2010.
- [7] Center for Climate and Energy Solutions, »What is Black Carbon?,« 4 2010. Dostupno na: <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2010/04/what-is-black-carbon.pdf>. [21. studenog 2018].
- [8] S. Barret, R. Britter i I. Waitz, »Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions,« *Environmental Science & Technology*, svez. 44, br. 19, pp. 7736-7742, 2010.
- [9] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, »Izvjješće o Inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske za razdoblje 1990.-2016. (NIR 2018),« Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, Zagreb, 2018.
- [10] H. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe i (eds), »2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,« IGES, Japan, 2006.
- [11] EPA, »Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2016 and inventory report 2018,« European Commission (DG CLIMA), Brussels, 2018.
- [12] P. Ilinčić, Nastupno predavanje: Ispitivanje emisija štetnih tvari vozila u stvarnim uvjetima vožnje, Zagreb: FSB, 2018.
- [13] Federal Aviation Administration, »Aviation & Emissions A Primer,« Siječanj 2005. Dostupno na: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/media/AEPRIMER.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/AEPRIMER.pdf). [27. studenog 2018].
- [14] D. Wuebbles, M. Gupta i M. Ko, »Evaluating the impacts of aviation on climate change,« *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, svez. 88, pp. 157-168, 2007.
- [15] M. Gunnar i et al., *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*, New York: USA, 2013.
- [16] Greenhouse Gas Protocol, »Global Warming Potential Values,« Greenhouse Gas Protocol, Washington, 2014.

- [17] Transport Canada, »Advisory Circular (AC) No. 100-001,« Transport Canada, . Dostupno na: [http://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/reference-centre/advisory-circulars/ac-100-001.html#s4\\_8](http://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/reference-centre/advisory-circulars/ac-100-001.html#s4_8). [22. studenog 2018.].
- [18] ICAO, Glossary v 1.2, Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- [19] EUROCONTROL/STATFOR, Glossary for Flight Statistics & Forecasts, Brussels: The Air Traffic Statistics and Forecast, 2005.
- [20] R. Niles, »Cessna to Offer Diesel Skyhawk,« AVweb. Dostupno na: [https://www.avweb.com/news/aopa/AOPAExpo2007\\_Cessna\\_172SSkyhawk\\_DieselEngine\\_196294-1.html](https://www.avweb.com/news/aopa/AOPAExpo2007_Cessna_172SSkyhawk_DieselEngine_196294-1.html). [23. studenog 2018.].
- [21] K. Thanikasalam i et al., »Piston Aviation Fuel Initiative (PAFI) - A Review,« *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, svez. 370, 2018.
- [22] EUROCONTROL, »Statistics and forecasts (STATFOR),« 2016d. Dostupno na: <http://www.eurocontrol.int/statfor>. [3. listopada 2018.].
- [23] GAMA, »2016 General Aviation Statistical Databook & 2017 Industry Outlook,« General Aviation Manufacturers Association, Washington, 2017.
- [24] L. Bogdan i H. McAdams, »Analysis of Aircraft Exhaust Emission Measurements,« EPA Division of Emission Control Technology Characterizaion & Control Development Branch, Ann Arbor, 1971.
- [25] EASA, EEA i EUROCONTROL, »European Aviation Environmental Report 2016,« European Aviation Safety Agency (EASA), Cologne, 2016.
- [26] ICAO, »Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation: Environmental Protection: Volume II - Aircraft Engine Emissions,« International Civil Aviation Organization, Montreal, 2008.
- [27] Hrvatska kontrola zračne plovodbe, Elektronički zbornik zrakoplovnih informacija (eAIP), Zagreb: Hrvatska kontrola zračne plovodbe d.o.o., 2018.
- [28] FOCA, »Aircraft piston engine emissions - Summary Report,« Federal Office of Civil Aviation, Bern, 2007.
- [29] Ž. Domović, S. Anić i N. Klaić, Rječnik stranih riječi: tuđice, posuđenice, izrazi, kratice i fraze, Zagreb: Sani-plus, 1998.
- [30] S. Gašparović, »Zračni promet i turizam Primorske Hrvatske,« *Geoadria*, svez. 16, br. 2, pp. 155-187, 2011.
- [31] European Environment Agency, »EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 - Update July 2017 (1.A.3.a Aviation),« Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017.
- [32] ICAO, »Emissions Databank (05/2018),« Dostupno na: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/edb-emissions-databank%20v25a%20%28web%29.xlsx>. [21. listopada 2018.].
- [33] EASA, »ICAO Aircraft Engine Emissions Databank,« Dostupno na: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. [21. 10. 2018.].
- [34] ICAO, »Environmental Technical Manual: Volume I - Procedures for the Noise Certification on Aircraft,« International Civil Aviation Organization, Montreal, 2018.

- [35] ICAO, »Environmental Technical Manual: Volume III - Procedures for the CO<sub>2</sub> Emissions Certification of Aeroplanes,« International Civil Aviation Organization, Montreal, 2018.
- [36] K. Rypdal, »Aircraft Emissions,« u *Background Papers – IPCC Expert Meetings on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Hayama, Kanagawa, 2002.
- [37] U.S. Energy Information Administration, »Carbon Dioxide Emissions Coefficients,«. Dostupno na: [https://www.eia.gov/environment/emissions/co2\\_vol\\_mass.php](https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php). [22. studenog 2018.].
- [38] KEM - Kyoto Electronics Manufacturing Co., Ltd., »Application - Density / Specific gravity meter,«. Dostupno na: <http://www.kyoto-kem.com/en/pdf/Application/EDAA-11002D.pdf>. [22. listopada 2018.].
- [39] ExxonMobil, »Avgas 100LL - Safety Data Sheet,«. Dostupno na: <https://www.exxonmobil.com/Xomfl/Core/Presentation/User%20control/Authoring/Containers/#lightbox-sample-P4DPUJEJ>. [22. listopada 2018.].
- [40] ExxonMobil, »Jet A / Jet A-1 - Product properties,«. Dostupno na: <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/products-and-services/products/jet-a-jet-a-1>. [22. listopada 2018.].
- [41] IPCC, »EFDB emission factor database,« Intergovernmental Panel on Climate Change,. Dostupno na: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>. [17. studenog 2018.].
- [42] ExxonMobil, »ExxonMobil Avgas,« ExxonMobil Commercial Fuel, US,. Dostupno na: <https://www.exxonmobil.com/english-US/Commercial-Fuel/pds/GLXXAvgas-Series>. [22. listopada 2018.].
- [43] CAEN, »Annexes to the National Inventory Report - Annex 3,« Croatian Agency for Environment and Nature, Zagreb, 2018.
- [44] IPCC, »Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual,« Intergovernmental Panel on Climate Change, 1997.
- [45] V. Sraga i Z. Lulić, »Emissions from General Aviation in the Republic of Croatia,« u *Digital proceedings of the 8th European Combustion Meeting*, Dubrovnik, 2017.
- [46] Clean Air Technology Center, Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>), Why and How They Are Controlled, North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [47] Z. Lulić, I. Mahalec i D. Kozarac, Klipni motori (Interna skripta), 2010.
- [48] Hrvatska kontrola zračne plovidbe, VFR priručnik, Zagreb: Hrvatska kontrola zračne plovidbe, 2018.
- [49] GeoNet, »Distance on a sphere: The Haversine Formula,« The Esri Community,. Dostupno na: <https://community.esri.com/groups/coordinate-reference-systems/blog/2017/10/05/haversine-formula>. [16. studenog 2018.].
- [50] FlightRadar24 AB, »FlightRadar24,« FlightRadar24 AB,. Dostupno na: <https://www.flightradar24.com>. [15. studenog 2018.].
- [51] S. L. Kuzu, »Estimation and dispersion modelin of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Ataturk International Airport,« *Air Quality Atmosphere & Health*, 2017.

**PRILOG 1.**

Baza podataka emisijskih faktora Saveznog ureda civilnog zrakoplovstva Švicarske

Code	Source	Engine	Synonyms	Thrust	Power	Test year	Bypass ratio	Remarks	Validity
P001	FAEED162	<b>Prop-200hp</b>	piston up to 200 PS		150			piston up to 200 PS	
P002	FAEED160	<b>Prop-300hp</b>	piston 201-300 PS		225			piston 201-300 PS	
P003	FAEED165	<b>Prop-500hp</b>	piston 301-500 PS		350			piston 301-500 PS	
P004	FOCA	<b>Prop&gt;500hp</b>	piston over 500 PS		1200			piston over 500 PS	
P011	FAEED159	<b>O-200</b>	O-200-...		100				
P111	FAEED163	<b>IO-320-DIAD</b>	IO-320-...		160				
P121	FAEED165	<b>TIO-540-J2B2</b>	TIO-540-...		350				
P131	FAEED160	<b>TSIO-360C</b>	TSIO-360-...		225				
PF01	FOCA	<b>IO-550-B</b>	IO-550		300	2005			
PF02	FOCA	<b>O-360-A3A</b>	O-360		180	2005			
PF03	FOCA	<b>IO-360-A1B6</b>	IO-360		200	2005			
PF04	FOCA	<b>Rotax 914</b>	Rotax 914 F..		114	2005			
PF08	FOCA	<b>O-320-E2A</b>	O-320		150	2006			
PF07	FOCA	<b>TSIO-520-WB</b>	TSIO-520		325	2006			
PF05	FOCA	<b>Rotax 912S</b>	Rotax 912S-..		100	2006			
PF06	FOCA	<b>Rotax 912</b>	Rotax 912		80	2004			
PF10	FOCA	<b>TAE-125-01</b>	TAE-125, Centurio		135	2006		Turbodiesel	
PF09	FOCA	<b>Rotax 582 DCDI</b>	Rotax 582		64	2000			
PF11	FOCA	<b>O-540-J3C5D</b>	O-540		235	2006			
PF12	FOCA	<b>IO-540-T4A5D</b>	IO-540		260	2006			



## Baza podataka emisijskih faktora Saveznog ureda civilnog zrakoplovstva Švicarske


Engine	FF To	FF Cl	FF App	FF Taxi	NOx To	NOx Cl	NOx App	NOx Taxi	VOC To	VOC Cl	VOC App	VOC Taxi
Prop-200hp	0,0112	0,0084	0,0059	0,0012	2,19	3,97	0,95	0,52	11,78	12,38	19,25	36,92
Prop-300hp	0,0168	0,0125	0,0077	0,0014	2,71	4,32	3,77	1,91	9,17	9,55	11,31	138,26
Prop-500hp	0,0327	0,0258	0,0125	0,0032	0,36	0,24	1,39	0,039	12,36	16,63	13,38	68,08
Prop>500hp	0,2243	0,0449	0,022	0,001	0,99	2,38	13,64	22	3,22	16,332	12,877	36,94
O-200	0,0057	0,0057	0,0032	0,001	4,87	4,87	1,14	1,58	20,81	20,81	33,22	29
IO-320-DIAD	0,0116	0,0077	0,0047	0,001	1,82	5,6	3,4	1,15	11,42	9,57	12,21	36,1
TIO-540-J2B2	0,0327	0,0258	0,0125	0,0032	0,36	0,24	1,39	0,39	12,36	16,63	13,38	68,08
TSIO-360C	0,0168	0,0125	0,0077	0,0014	2,71	4,32	3,77	1,91	9,17	9,55	11,31	138,26
IO-550-B	0,0182	0,018	0,0098	0,0038	6,64	7,31	2,7	0,52	12,65	12,32	11,52	42,62
O-360-A3A	0,012	0,0102	0,0054	0,0016	3,51	5,81	2,99	1,43	15,32	12,88	16,41	27,36
IO-360-A1B6	0,0136	0,0106	0,0062	0,0014	1,48	1,49	1,09	2,19	15,46	16,66	20,63	48,31
Rotax 914	0,0072	0,0056	0,0029	0,0018	6	18	14	5	15	12,3	16	38,6
O-320-E2A	0,01	0,008	0,0048	0,0013	6,68	6,92	19,44	1,64	12,61	15,06	13,69	15,95
TSIO-520-WB	0,027	0,023	0,014	0,0061	2,96	2,09	1,17	3,54	15,8	13,9	12,1	8,2
Rotax 912S	0,00534	0,00412	0,0023	0,0005	40,35	30,12	6,35	0,86	13,27	20,27	24,13	52,14
Rotax 912	0,0038	0,0031	0,0018	0,0012	12,71	10,29	14,28	0,8	14,08	14,53	12,76	21,03
TAE-125-01	0,0064	0,0051	0,0025	0,0003	20,01	22,78	26,96	16,91	1,05	1,25	3,29	9,78
Rotax 582 DCDI	0,004	0,0036	0,0016	0,0006	4	1	1	0	380	404	481	443
O-540-J3C5D	0,0166	0,014	0,0066	0,0016	1	1	0	0	20	22	51	32
IO-540-T4A5D	0,0167	0,0148	0,0074	0,0025	3	3	6	1	13,9	14	16,3	45,6

## Baza podataka emisijskih faktora Saveznog ureda civilnog zrakoplovstva Švicarske

Engine	CO To	CO Cl	CO App	CO Taxi	PM To	PM Cl	PM App	PM Taxi
<b>Prop-200hp</b>	1077,4	989,5	1221,5	1077	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>Prop-300hp</b>	1082	960,8	995,1	592,2	0,1	0,07	0,4	0,5
<b>Prop-500hp</b>	1442,1	1470,9	1261,6	1293,7	0,1	0,7	0,4	0,5
<b>Prop&gt;500hp</b>	35,91	499,99	1262	1294	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>O-200</b>	974,1	974,1	1187,8	644,4	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>IO-320-DIAD</b>	1192,3	888,2	944,3	619,9	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>TIO-540-J2B2</b>	1442,1	1470,9	1261,6	1293,7	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>TSIO-360C</b>	1082	960,8	995,1	592,2	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>IO-550-B</b>	826,59	795,04	1064,62	1163,39	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>O-360-A3A</b>	1146,09	942,53	1082,92	1080,72	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>IO-360-A1B6</b>	1293,95	1305,69	1364,62	1094,75	0,1	0,2	0,5	0,1
<b>Rotax 914</b>	1020	664	776	994	0,003	0,002	0,001	0,001
<b>O-320-E2A</b>	815,5	836,6	695,6	689,6	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>TSIO-520-WB</b>	1018	1153	1299	462	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>Rotax 912S</b>	531,42	461,34	936,17	1281,03	0,003	0,002	0,001	0,001
<b>Rotax 912</b>	700,69	760,18	569,47	1206,17	0,003	0,002	0,001	0,001
<b>TAE-125-01</b>	7,51	6,65	16,06	24,8	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>Rotax 582 DCDI</b>	826	1047	803	515	1	1	1	1
<b>O-540-J3C5D</b>	1327	1227	1425	1210	0,1	0,07	0,04	0,05
<b>IO-540-T4A5D</b>	1010	978	819	1000	0,1	0,07	0,04	0,05

## PRILOG 2.

Primjer rezultata provedenog mjerenja (FOCA)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Federal Office of Civil Aviation, Environmental Affairs  
**ENGINE EXHAUST EMISSIONS MEASUREMENT  
PISTON ENGINES**

ENGINE IDENT	Lyc O-360-A3A	CARBURETOR	MA-4-5
UNIQUE ID NUMBER	PF02	INJECTION NOZZLE	-
ENGINE TYPE	4Cyl 4Stroke Air cooled	RATED POWER (P <sub>00</sub> ) (HP)	180
PROPELLER TYPE	Sensenich 76MSS1-0-38		

DATA STATUS

☒ EMISSION INVENTORY  
☐ PRE-REGULATION  
☐ CERTIFICATION  
☐ REVISED

MEASUREMENT STATUS

☒ GROUND BASED FIXED PITCH PROP  
☐ GROUND BASED VARIABLE PITCH PROP

EMISSIONS STATUS

☒ DATA CORRECTED TO REFERENCE TEMPERATURE  
☐ DATA CORRECTED TO REFERENCE (ANNEX 16 VOLUME II)  
☐ V5 CALCULATION METHODOLOGY VERSION NUMBER

MEASURED DATA

MODE	POWER SETTING (%)	TIME (minutes)	FUEL FLOW (kg/s)	EI HC (g/kg)	EI CO (g/kg)	EI NOx (g/kg)	PM (---) (---)
TAKE-OFF	100	0.3	0.012	15.3	1132	3	
CLIMB OUT	85	2.5	0.0102	12.9	933	5	
CRUISE	65	60	0.0078	12.1	818	10	
APPROACH	45	3	0.0054	16.4	1069	2	
TAXI	12	12	0.0016	27.4	1058	1	
CRUISE LEAN	65	60	0.0064	8.5	293	39	
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)			3.87	70.5	3930	12	
CRUISE 1 HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)			23.0	197	6743	903	
NUMBER OF TESTED ENGINES			1	1	1	1	
NUMBER OF TESTS			3	3	3	3	

TEST ENGINE STATUS

☒ NEWLY MANUFACTURED ENG.  
☐ USED ENGINE  
☐ DEDICATED TO PRODUCTION  
☐ OTHER (SEE REMARKS)

CURRENT ENGINE STATUS

☒ IN PRODUCTION  
☐ OUT OF PRODUCTION  
☐ OUT OF SERVICE

ATMOSPHERIC CONDITIONS

BAROMETER QNH (hPa) 1020  
TEMPERATURE (°C) 7  
DEW POINT (°C) 6  
DENSITY ALTITUDE (ft) 915

MANUFACTURER:

TEST ORGANIZATION: FOCA  
TEST LOCATION: LSZB  
TEST DATES: 18. Okt 05

REMARKS:

FUEL

SPEC AVGAS 100LL  
HC C7H13

REFERENCE:

33.05-003 groundmeasurement5.carburated.  
fixprop.V5.HBEYS\_051018\_rit  
Experts: W.Bula/T. Rindlbacher

**PRILOG 3.**

Primjer naslovne strane podataka o aerodromu iz VFR priručnika s označenim podatkom o GPS koordinatama aerodroma

VFR priručnik  
VFR Manual

LDVA AD 2-1  
25 MAY 17

**LDVA AD 2.1 NAZIV I OZNAKA MJESTA AERODROMA**  
**LDVA AD 2.1 AERODROME LOCATION INDICATOR AND NAME**

LDVA - AERODROM VARAŽDIN / Varaždin  
LDVA - VARAŽDIN / Varaždin AERODROME

**LDVA AD 2.2 ZEMLJOPISN I ADMINISTRATIVNI PODACI**  
**O AERODROMU**  
**LDVA AD 2.2 AERODROME GEOGRAPHICAL AND**  
**ADMINISTRATIVE DATA**

1	ARP koordinate i položaj na AD/ ARP coordinates and site at AD	461739.18N 0162300.50E
2	Smjer i udaljenost od (grada)/ Direction and distance from (city)	2 KM E od/from Varaždin
3	Nadmorska visina/Odnosna temperatura AD Elevation/Reference temperature	547 FT / 28.2°C (JUL)
4	Geoidna undulacija na/Geoid undulation at AD ELEV PSN	147 FT
5	MAG VAR/Godišnja promjena MAG VAR/Annual change	3°E (2012) / 0.1° increasing
6	Operator AD, adresa, telefon, telefax, AFS, E-mail, Web site /  AD Operator, address, telephone, telefax, AFS, E-mail, Web site	Diamond Aviation Center d.o.o. Mihovila Pavleka Miškine 72 42000 Varaždin Tel: (+385 42) 420600, (+385 42) 420620 Mobile: (+385 95) 4206000 Fax: (+385 42) 420610 E-mail: ldva@diamondair.hr, dac@diamondair.hr Web site: www.diamondair.hr
7	Dozvoljene vrste prometa (IFR/VFR)/ Types of traffic permitted (IFR/VFR)	VFR
8	Primjedbe/ Remarks	Nil